



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

RAPPORT

DEMANDE D'AUTORISATION DE CREATION DU PROJET CIGEO

« GP1 » - EVALUATION DES DONNEES DE BASE
RETENUES POUR L'EVALUATION DE SURETE

PSE-ENV

Rapport IRSN N° 2024-00212

Rapport établi en support à l'avis IRSN/2024-00051 du 12 avril 2024

RÉSUMÉ

Le présent rapport constitue l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le Dossier de demande d'autorisation de création (DDAC) du projet Cigéo relatif au stockage de déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en formation géologique profonde, transmis par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra). Cet examen fait suite à plusieurs expertises menées par l'IRSN depuis le Dossier 2005 et plus particulièrement à l'examen du Dossier d'options de sûreté (DOS) déposé par l'Andra en 2016.

L'ASN a sollicité une expertise organisée selon trois groupements de thématiques, qui sont i) les données de base retenues pour l'évaluation de la sûreté de Cigéo, ii) l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation des installations de surface et souterraines et iii) l'évaluation de sûreté en phase d'après fermeture, instruits respectivement dans le cadre des GP1, GP2 et GP3. Le présent rapport concerne le premier groupement de thématiques.

De l'examen de ce dossier et des informations transmises au cours de l'instruction, l'IRSN retient les principaux éléments suivants.

Concernant les colis de déchets, les familles de colis primaires des inventaires de référence et de réserve sont bien identifiées et cohérentes avec les scénarios industriels prospectifs retenus. L'IRSN considère que les connaissances présentées relatives à l'inventaire de référence sont appropriées pour dimensionner l'installation et évaluer sa sûreté. Toutefois, des incertitudes pouvant impacter le nombre d'alvéoles et les chroniques de stockage persistent, en particulier sur les volumes de colis primaires de déchets dont le conditionnement reste à définir (boues de STE2, colis PIVIC...), les modes de stockage (avec ou sans conteneur) et le traitement des combustibles usés MOX et du CEA. Ces incertitudes devront être accommodées par le caractère flexible de l'installation, qui est un point d'attention de l'examen en GP2. En outre, l'inventaire en substances toxiques chimiques à considérer pour les études d'impact de Cigéo mérite d'être consolidé. Par ailleurs, l'IRSN estime que les données présentées pour l'inventaire de réserve sont globalement suffisantes pour fonder les études d'adaptabilité de Cigéo aux scénarios industriels prospectifs retenus et, le cas échéant, au stockage des déchets FA-VL. De manière générale, l'IRSN estime que l'évaluation des dates de réception des derniers colis, tant pour l'inventaire de référence que pour l'inventaire de réserve, comporte toutefois de fortes incertitudes. Le stockage potentiel du plutonium séparé et des rebuts de MOX appelle en outre une feuille de route pour étudier sa faisabilité.

Concernant les données de site en surface et subsurface, l'Andra a réalisé des caractérisations hydrogéologiques et géotechniques convenables des calcaires du Barrois au niveau de la zone descendrière. Celles-ci nécessitent d'être poursuivies afin notamment de pouvoir bien appréhender le fonctionnement de l'aquifère du Barrois et de détecter toute cavité susceptible d'impacter la stabilité des futurs bâtiments. L'IRSN estime que les investigations complémentaires qui ont été reportées doivent être menées au niveau de la zone puits dans les meilleurs délais. En outre, l'IRSN souligne le travail d'ores et déjà conséquent réalisé pour établir un état initial radiologique et chimique de l'environnement du projet Cigéo et prend note de la nouvelle campagne prévue, qui devrait permettre d'actualiser et compléter cet état initial. S'agissant des niveaux d'aléas naturels susceptibles d'impacter Cigéo, l'IRSN considère que les aléas inondation, vent et tornade sont évalués de manière satisfaisante. L'estimation des valeurs extrêmes de température et de neige devra, selon l'IRSN, tenir compte de données issues de davantage de stations de mesure ainsi que de périodes de retour plus importantes. Il conviendra enfin de tenir compte du changement climatique, en termes de définition des niveaux d'aléas susceptibles d'évoluer et de capacité de modifier l'installation pour y faire face.

Concernant le sous-sol du site de Meuse/Haute-Marne, l'Andra a réuni les connaissances nécessaires pour évaluer la sûreté de Cigéo au stade de la demande d'autorisation de création de cette installation, relatives notamment à la tectonique du site, à son contexte structural et à l'évolution géoprospective. Des flexures potentielles identifiées par méthode géophysique en 2010 dans le nord de la zone d'implantation de l'installation

nécessite cependant, selon l'IRSN, la mise en œuvre d'un programme de reconnaissance de la formation hôte au droit de ces flexures afin d'adapter, si besoin, la conception de l'installation souterraine. Par ailleurs, l'IRSN confirme comme l'Andra l'absence de ressources naturelles d'intérêt au droit du site. S'agissant de l'hydrogéologie des aquifères de l'Oxfordien et du Dogger, l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre l'amélioration de leur représentation dans le modèle hydrogéologique, en tenant compte notamment des données qu'elle prévoit d'acquérir en forages sur l'Oxfordien (en particulier sur la Série grise) et sur le Dogger, ainsi que des évolutions géoprospectives intégrant le changement climatique.

Concernant les propriétés de la roche hôte du Callovo-Oxfordien, l'IRSN considère que la base de connaissances établie par l'Andra relative aux processus de confinement hydrodynamique et chimique constitue un référentiel de qualité en appui à sa démonstration de sûreté. L'influence possible d'une surpression d'origine hydraulique devra être prise en compte, selon l'IRSN, dans l'évaluation de la sûreté du stockage après sa fermeture. S'agissant des perturbations géomécaniques dues à l'implantation de l'installation de stockage, l'Andra présente un état des connaissances satisfaisant sur les perturbations thermo-hydrromécaniques induites par les alvéoles de stockage de déchets HA et sur l'évolution à long terme de la zone de roche endommagée autour des alvéoles MA-VL. Quelques éléments restent à consolider, relatifs notamment à l'influence possible des différences lithologiques ou de profondeur entre le niveau principal du Laboratoire souterrain et celui de Cigéo. Compte tenu de l'importance pour la sûreté après-fermeture d'un scellement performant des puits d'accès à l'installation souterraine, un point particulier d'attention réside dans la méthode de creusement qui sera retenue pour les puits. A cet égard, l'IRSN considère que cette méthode devra relever des meilleures techniques disponibles et ne devra pas créer plus d'endommagement de la roche qu'une méthode d'abattage mécanique.

S'agissant du transitoire hydraulique-gaz, qui résulte d'une production importante de gaz de corrosion et de radiolyse après la fermeture du stockage, le modèle numérique utilisé par l'Andra pour simuler ce transitoire a été amélioré, notamment par la prise en compte de pressions capillaires d'entrée de gaz non nulles, mais n'a pas été revalidé expérimentalement. L'IRSN considère qu'il est nécessaire de poursuivre la validation de ce modèle et de préciser ses différentes incertitudes, notamment celles relatives à la phénoménologie prise en compte, aux nombreux paramètres utilisés et au « terme source gaz ». Ce modèle conduit à une estimation médiane (i.e. non pénalisante) de la pression maximale de gaz dans le stockage inférieure au seuil de fracturation « en grand » de la formation hôte du Callovo-Oxfordien. Cependant, il conduit à une valeur proche de ce seuil dans le cas d'une combinaison d'hypothèses jugée très peu réaliste par l'Andra mais envisagée dans le cadre d'une étude de sensibilité, sans que l'incertitude sur ce résultat ne soit connue précisément. A cet égard, l'IRSN considère qu'il est nécessaire de définir une exigence sur la pression de gaz à ne pas dépasser, qui respecte une marge par rapport au seuil de fracturation de la roche et qui fera l'objet de vérifications *in situ* au fur et à mesure de la construction de Cigéo.

S'agissant des effets des perturbations chimiques sur les propriétés de confinement de la roche hôte, l'IRSN estime que l'évaluation des conséquences présentée par l'Andra d'une part pour la perturbation alcaline provenant des bétons et d'autre part pour le panache salin issu de déchets MA-VL est globalement satisfaisante. Les travaux en cours relatifs aux espèces complexantes issues de la dégradation des composés organiques présents dans les composants précités constitue en outre une avancée notable pour apprécier l'influence de ces espèces sur la mobilité des radionucléides.

Concernant l'évolution des autres composants du stockage (colis, matériaux cimentaires, aciers), l'Andra retient, pour les colis primaires de l'inventaire de référence et de réserve, des modèles de relâchement des radionucléides et des valeurs de paramètres associées cohérents avec l'état des connaissances relatives à la dégradation des matériaux constituant les colis primaires. S'agissant des matériaux cimentaires, l'Andra prévoit d'utiliser, pour les soutènements/revêtements des galeries et alvéoles MA-VL ainsi que pour les massifs d'appui des scellements, un béton de type Portland pour lequel elle dispose de recherches de qualité permettant une bonne connaissance des perturbations chimiques et des conséquences mécaniques à court, moyen et long termes. L'IRSN observe qu'un programme de développement serait nécessaire dans le cas où les bétons bas pH seraient de nouveau envisagés, afin de s'assurer que la formulation retenue permette d'atteindre les

performances visées. S'agissant des aciers, l'IRSN constate que la première formulation du matériau cimentaire prévu dans l'espace annulaire entre la roche et le chemisage d'un alvéole HA, testée par l'Andra au stade du DDAC, conduit à des vitesses de corrosion significatives, qui ne permettent pas de garantir les fonctions du chemisage et du conteneur de stockage. L'IRSN prend note du programme de développement en cours avec d'autres formulations pour ce matériau et de premiers résultats montrant des vitesses de corrosion faibles en cohérence avec le comportement attendu du type d'acier retenu en milieu cimentaire à pH élevé. Il importe que ce programme, qui devra permettre de disposer de résultats probants pour s'assurer du bon dimensionnement des composants avant le creusement du premier alvéole HA, soit précisé en vue de l'examen du GP3.

Concernant les scellements, l'Andra retient à présent des concepts de référence « passants au gaz » pour diminuer la pression de gaz dans le stockage. L'IRSN constate que ces concepts sont encore au stade des principes de conception, avec pour composant principal un noyau argileux dont la composition exacte reste à définir. La mise en place de démonstrateurs de scellement de descenderie et de galerie est prévue dès le début de la construction de Cigéo. La resaturation d'un scellement de descenderie étant plus rapide que celle d'un scellement de galerie, un début de performance hydraulique devrait pouvoir y être observé pendant la phase pilote. L'IRSN estime qu'une synthèse des résultats de ces démonstrateurs devra être présentée pour le bilan de la phase pilote afin de consolider le concept de référence complet de chaque type de scellement (puits, descenderies et galeries), incluant toutes les étapes de leur réalisation, et pour les liaisons surface-fond, les performances atteintes.

Enfin, s'agissant de l'adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve et aux principales évolutions récemment annoncées de la politique énergétique, l'emprise du stockage pourrait dépasser, selon les scénarios étudiés, de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres les limites actuelles de la Zone d'Implantation des Ouvrages Souterrains (ZIOS), tout en restant dans la Zone de Transposition dans laquelle la faisabilité d'un stockage a été montrée. Aussi, l'IRSN n'a pas identifié à ce stade de l'examen (GP1) d'élément de connaissances relatives à la géologie qui remette en cause l'adaptabilité de Cigéo. L'impact sur la sûreté de l'extension du stockage à des zones où les valeurs des critères de choix de site seraient différentes de celles retenues pour définir la ZIOS devra néanmoins être évaluée.

En conclusion, l'Andra a mené des études approfondies sur le site de Meuse/Haute-Marne, la formation hôte du Callovo-Oxfordien, les matériaux ouvragés et les colis, qui constituent un socle de connaissances de nature à permettre l'évaluation de la sûreté de Cigéo au stade d'une demande d'autorisation de création. Les principales voies d'amélioration identifiées par l'IRSN à l'issue du présent examen, résumées ci-dessus, ont pour la plupart fait l'objet d'un engagement de la part de l'Andra visant à apporter les compléments de consolidation nécessaires pour les prochaines étapes du développement de Cigéo, notamment en vue du bilan de la phase pilote. L'IRSN relève deux points d'attention concernant les données disponibles à ce stade pour l'évaluation de sûreté, relatifs d'une part au stockage des colis de déchets HA, en termes d'incertitudes sur les vitesses de corrosion des aciers et sur les propriétés de la roche hôte au droit des flexures observées dans le nord du quartier HA, et d'autre part aux ouvrages de scellement. Ces points d'attention ne sont pas, selon l'IRSN, rédhibitoires à la création de premiers ouvrages. Néanmoins, l'IRSN encourage l'Andra à s'appuyer sur la phase pilote pour poursuivre, dès son démarrage et avec des points d'étapes qui restent à définir, la consolidation des données de base en support à l'évaluation de la sûreté du stockage. Le présent examen est complété par celui de la démonstration de sûreté en exploitation et après fermeture dans le cadre des GP2 et GP3.

TABLE DES MATIÈRES

1. CONTEXTE	13
1.1. Objet du présent rapport	13
1.2. Contexte	14
1.3. Présentation du dossier de l'Andra	15
2. DESCRIPTION DE CIGEO	17
2.1. Le site de Meuse/Haute-Marne	17
2.1.1. Cartographie du site	17
2.1.2. Les principales formations sédimentaires du sous-sol du site de Meuse/Haute-Marne	18
2.1.3. La couche du Callovo-Oxfordien	18
2.1.4. Les niveaux aquifères principaux du site de Meuse/Haute-Marne.....	20
2.2. L'architecture du stockage	20
2.2.1. Installations de surface	21
2.2.2. Liaisons surface-fond	22
2.2.3. Installation souterraine, concepts de stockage.....	24
2.3. Inventaire de référence et colis de déchets	30
2.3.1. Les colis de stockage HA	31
2.3.2. Les colis de stockage MA-VL	32
2.4. Les différentes phases de vie de Cigéo	34
2.4.1. Chronologie des phases de vie de Cigéo	34
2.4.2. Définition de la phase industrielle pilote et enjeux associés	36
2.5. Fermeture du stockage	36
2.5.1. Stratégie de fermeture	36
2.5.2. Fermeture des alvéoles HA, des quartiers pilote et de stockage HA	37
2.5.3. Fermeture des alvéoles MA-VL et du quartier de stockage MA-VL	38
2.5.4. Fermeture des zones de soutien logistique exploitation et travaux	39
2.5.5. Scellements de fond	39
2.5.6. Fermeture et scellements des liaisons surface-fond.....	41
2.6. Adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve	41
3. LES COLIS DE DECHETS	44
3.1. Scénarios industriels prospectifs	44
3.2. Inventaire de référence	47
3.2.1. Introduction	47
3.2.2. Colis primaires HA.....	48
3.2.3. Colis primaires MA-VL.....	49
3.3. Inventaire de réserve	51
3.3.1. Incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion	52

3.3.2.	Incertitudes liées à des évolutions de politique énergétique	52
3.4.	Chroniques de livraison	55
3.4.1.	Phase industrielle pilote	55
3.4.2.	Après la phase industrielle pilote	55
3.5.	Inventaires radiologiques et chimiques	56
3.5.1.	Inventaire radiologique	56
3.5.2.	Inventaire en substances toxiques chimiques	58
3.6.	Modes de stockage des colis primaires.....	60
3.7.	Spécifications préliminaires d'acceptation	61
3.7.1.	Démarche générale pour les colis primaires de l'inventaire de référence	61
3.7.2.	Colis primaires de l'inventaire de réserve	62
3.8.	Conclusion	62
4.	LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE EN SURFACE ET SUBSURFACE	63
4.1.	Connaissances du site en surface et subsurface	63
4.1.1.	Aquifère superficiel du Barrois	63
4.1.2.	Caractérisations géotechniques en zone de descenderie et en zone puits	65
4.1.3.	État initial de l'environnement	67
4.2.	Aléas naturels	69
4.2.1.	Aléa inondation externe	69
4.2.2.	Aléas météorologiques	71
5.	LE SOUS-SOL DU SITE DE MEUSE/Haute-MARNE.....	76
5.1.	Géologie du site : incertitudes résiduelles et reconnaissances à venir	76
5.1.1.	Contexte tectonique du site	76
5.1.2.	Contexte structural du site	77
5.1.3.	Conséquences de l'évolution des connaissances tectoniques et structurales sur l'évaluation du SMPP	80
5.1.4.	Stratégie de reconnaissances géologiques du site	81
5.2.	Ressources naturelles du sous-sol	83
5.3.	Géodynamique passée et évolution géoprospective	84
5.3.1.	Evolution géoprospective déduite des observations géologiques	84
5.3.2.	Evolution géoprospective tenant compte d'une évolution perturbée du climat.....	86
5.4.	Hydrogéologie du secteur de Meuse/Haute-Marne	87
5.4.1.	Caractérisation et conceptualisation des couches aquifères	87
5.4.2.	Modélisation hydrogéologique.....	87
6.	PROPRIETES ET EVOLUTION DU COX.....	95
6.1.	Transferts dans le COX sain.....	95
6.1.1.	Processus et paramètres hydrodynamiques	95
6.1.2.	Processus et paramètres chimiques	99

6.2.	Effets du transitoire hydraulique-gaz sur les propriétés du COX	101
6.2.1.	Principaux résultats de la simulation du transitoire hydraulique-gaz à l'échelle du stockage	102
6.2.2.	Terme source gaz.....	103
6.2.3.	Seuil de fracturation du Callovo-Oxfordien	105
6.2.4.	Pression maximale de gaz attendue dans le stockage	108
6.2.5.	Effet piston.....	109
6.3.	Effets des perturbations transitoires géomécaniques sur les propriétés de transfert du COX	110
6.3.1.	Endommagement du COX lié au creusement des ouvrages	110
6.3.2.	Sections des ouvrages de grand diamètre destinées à être scellées	112
6.3.3.	Technique de creusement des puits dans le Callovo-Oxfordien	113
6.3.4.	Propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles MA-VL	114
6.3.5.	Propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles HA (THM)	116
6.4.	Effets des perturbations transitoires chimiques sur les propriétés de transfert dans le Callovo-Oxfordien.....	117
6.4.1.	Perturbation alcaline par les bétons des revêtements et soutènements	117
6.4.2.	Perturbation saline par les déchets salins MA-VL	118
6.4.3.	Perturbation organique par les déchets organiques MA-VL	119
6.5.	Propriétés initiales et évolution des matériaux de remblais.....	122
7.	ÉVOLUTION DES COLIS, DES MATERIAUX CIMENTAIRES ET METALLIQUES	124
7.1.	Évolution des colis après fermeture du stockage	124
7.1.1.	Déchets salins	124
7.1.2.	Déchets métalliques	126
7.1.3.	Déchets vitrifiés	127
7.1.4.	Autres déchets de l'inventaire de référence	129
7.1.5.	Déchets de l'inventaire de réserve	129
7.2.	Évolution des matériaux cimentaires	131
7.3.	Évolution des aciers.....	133
8.	EVOLUTION DES SCELLEMENTS.....	138
8.1.	Rôle et particularités des différents scellements	138
8.2.	Performances des scellements et mélanges bentonite/sable	140
8.3.	Démonstrateurs de scellements.....	142
9.	ADAPTABILITE DE CIGEO A L'INVENTAIRE DE RESERVE	144
10.	CONCLUSION.....	147

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1. Carte géologique du « secteur de Meuse/Haute-Marne » et position de la zone d’implantation des ouvrages souterrains de stockage (ZIOS) dans la zone de transposition (ZT) ([34], modifié : la carte intègre la mise à jour par l’Andra de la ZFD [35])	17
Figure 2. Logs des principales formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne. À gauche : couches du Mésozoïque ([37], modifié). À droite : détail de la formation du COX au niveau du LSMHM ([37], modifié).....	19
Figure 3. Schéma des installations de surface et souterraine de Cigéo [39]. En orange, la zone d’implantation des ouvrages souterrains (ZIOS).....	21
Figure 4. Illustration des liaisons surface-fond ([40], modifié).....	22
Figure 5. Illustration de la zone de stockage MA-VL [40].....	27
Figure 6. Illustration des différentes parties d’un alvéole MA-VL [40].....	27
Figure 7. Exemples de sections d’alvéoles MA-VL [40].	28
Figure 8. Illustration du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA à terminaison [49].....	29
Figure 9. Illustration d’un alvéole HA après mise en place du bouchon de fermeture provisoire [40].	30
Figure 10. Illustration des composants d’un conteneur de stockage HA pour colis primaire de déchets vitrifiés provenant de l’usine d’Orano La Hague [51].	31
Figure 11. Modèles de colis de stockage HA [52].....	32
Figure 12. Illustration des composants d’un conteneur de stockage MA-VL de type CS4.1 [51].	33
Figure 13. Illustration des ouvrages souterrains construits lors de la phase de construction initiale [55].....	34
Figure 14. La phase industrielle pilote dans le calendrier de Cigéo [55].....	35
Figure 15. Localisation des scellements de fond pour le quartier MA-VL (1), pour les quartiers pilote et de stockage HA (2) et des démonstrateurs dans l’installation souterraine ; projection des scellements de descenderies (3) et de puits (4) [45].	38
Figure 16. Illustration d’un alvéole MA-VL complètement fermé [50].	39
Figure 17. Schéma de principe de l’option de référence pour les scellements de fond [56].	40
Figure 18. Schéma de principe des variantes de scellement de fond (a) avec confinement du noyau par frottement des massifs d’appui en béton non ancrés et du remblai, (b) avec confinement du noyau par frottement du remblai et (c) avec saignées pour la mise en place du noyau [58].	40
Figure 19. Schémas de principe des scellements de puits et de descenderies [56].	41
Figure 20. Exemple d’architecture de l’installation souterraine retenue pour les évaluations de sûreté après-fermeture dans le cas du stockage de l’inventaire de réserve associé au SNR enveloppe et des déchets FA-VL (transmis au cours de l’instruction).....	43
Figure 21. Coupe est-ouest réalisée dans le bloc de sismique 3D de 2010. Les horizons repères ont été surlignés par différentes couleurs par l’Andra et les ruptures nettes dans la continuité de ces horizons ont été marquées par des traits pointillés ([81], modifié).....	79

Figure 22. Trajectoires du panache de particules dans l’Oxfordien moyen (gauche) et dans le Dogger (droite) [137].....	90
Figure 23. Profil vertical des charges hydrauliques mesurées dans le COX au niveau du LSMHM (en rouge) et profil vertical sans surpression déduit des charges mesurées dans l’Oxfordien et le Dogger (en bleu) [81].....	98
Figure 24. Origine des quantités de gaz produit dans le stockage [174].	102
Figure 25. Évolution de la saturation en eau des principaux composants de l’installation souterraine [174].	102
Figure 26. Évolution des pressions maximales de gaz dans différentes zones de l’installation souterraine [174]......	103
Figure 27. Couplages thermique et hydraulique-gaz autour d’un alvéole HA [174]......	103
Figure 28. Bilan de la répartition de l’hydrogène à un million d’années [174].	103
Figure 29. Contrainte naturelle verticale au niveau des ouvrages de l’installation de stockage Cigéo [81].....	106
Figure 30. Représentation schématique de la zone endommagée autour des ouvrages dans l’UA et correspondance hydraulique avec l’EDZ et la zone perturbée [181]. R : rayon de l’ouvrage excavé.	111
Figure 31. Représentation de l’endommagement induit autour des ouvrages dans l’argile à Opalines observé au Mont-Terri (à gauche) ; modèle 2D de la fissuration induite autour de la niche à -445 mètres au LSMHM (schéma non à l’échelle) en 2005 et 2016 (à droite)	111
Figure 32. Extensions enveloppes de zone endommagée en voûte et en radier d’un alvéole MA-VL sur le long terme rapportées à la hauteur excavée, en fonction du taux de vides	115
Figure 33. Resaturation rapide de la partie haute d’un noyau de scellement de puits par l’eau de l’Oxfordien sus-jacent	139
Figure 34. Pression de percée au gaz obtenue sur échantillons en fonction de la densité sèche en bentonite avec trois proportions de bentonite (20 %, 40 % et 70 %) [57].	141

Tableaux

Tableau 1. Scénarios de l'édition 2018 de l'IN.....	30
Tableau 2. Modèles de colis de stockage MA-VL [54].	33
Tableau 3. Facteurs multiplicatifs retenus en fonction du niveau de connaissance.....	57
Tableau 4. Inventaire radiologique pour certains radionucléides à la date de fermeture ([51][80] et éléments transmis au cours de l'instruction).	58
Tableau 5. Inventaire en substances toxiques chimiques (en tonnes) évalué par l'Andra pour les déchets uniquement [51][80].	59
Tableau 6. Inventaire en substances toxiques chimiques (en tonnes) évalué par l'Andra pour les matrices et les enveloppes des colis primaires de l'inventaire de référence [83].	59
Tableau 7. Valeurs de conductivité hydraulique verticale (Kv) et horizontale (Kh) du COX en grand retenues par l'Andra aux stades du DOS et du DDAC et valeurs issues de l'étude statistique fournie au stade du DDAC [149].	97
Tableau 8. Termes sources en molécules organiques, substances organiques complexantes associées et produits de dégradation complexants identifiés par l'Andra [82].	120

1. CONTEXTE

1.1. Objet du présent rapport

Par lettre citée en référence [1] (cf. Annexe A1), l'Autorité de sûreté nucléaire (**ASN**) a demandé l'avis de l'IRSN sur le Dossier de Demande d'Autorisation de Création (**DDAC**) du projet Cigéo et a sollicité une expertise organisée selon trois groupements de thématiques :

- les données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo ;
- l'évaluation de sûreté en phase d'exploitation des installations de surface et souterraines ;
- l'évaluation de sûreté en phase d'après fermeture.

L'ASN a en outre identifié des thèmes transverses, en vue de leur intégration dans l'expertise de chacun de ces trois groupements thématiques. Il s'agit notamment des éléments de définition de la phase industrielle pilote, des optimisations présentées, des spécifications préliminaires d'acceptation des colis de déchets, de la réversibilité ainsi que des conséquences liées au changement climatique.

Le présent rapport concerne le premier groupement de thématiques. Pour celui-ci, l'ASN a demandé à l'IRSN d'examiner les connaissances réunies et les hypothèses retenues par l'Andra pour établir la démonstration de sûreté de Cigéo relatives i) au site retenu pour accueillir Cigéo et à son évolution incluant l'après-fermeture, ii) aux propriétés des composants du système de stockage et à leurs évolutions et iii) aux inventaires de colis de déchets dits de « référence » et de « réserve », en portant une attention particulière à la méthodologie d'acquisition des données, au caractère suffisant de ces données au regard des modèles retenus ainsi qu'à l'estimation des incertitudes prises en compte à ce stade. L'ASN a précisé que cet examen devra notamment tenir compte des conclusions qu'elle a formalisées à l'issue de l'examen du Dossier d'Options de Sûreté (**DOS**), des réponses aux demandes et engagements résultant des examens précédents, du cadre réglementaire, ainsi que de son avis sur les études relatives à la gestion des déchets de haute activité (**HA**) et de moyenne activité à vie longue (**MA-VL**) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (**PNGMDR**) 2016-2018.

Concernant la connaissance du site au regard de l'évaluation de sûreté, l'ASN a demandé à l'IRSN d'examiner :

- l'environnement de surface, comprenant son état initial, ses caractéristiques météorologiques, géotechniques, son hydrologie et les activités anthropiques connexes ;
- le contexte géologique, y compris ses ressources naturelles potentielles (en particulier la géothermie) ;
- l'hydrogéologie : modèles conceptuel et hydrogéologique des aquifères ;
- l'évolution du site, notamment climatique et géodynamique, et ses conséquences sur l'hydrogéologie ;
- les propriétés de la roche hôte.

Concernant les composants du stockage (colis de déchets, composants ouvragés et roche hôte) et leurs évolutions, l'ASN a demandé à l'IRSN d'inclure dans son expertise :

- les transitoires thermo-hydro-mécaniques et hydraulique-gaz tout au long des phases de vie du système de stockage, les propriétés chimiques de la roche hôte, liés aux perturbations dues à la construction et à l'exploitation de Cigéo ainsi qu'à l'interaction entre les composants et la roche hôte ;
- le comportement des colis et les modèles de relâchement ;
- l'évolution des matériaux (aciers, bétons, matériaux argileux) ;
- le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques dans ces différents milieux.

Concernant enfin les inventaires des colis de déchets dits « de référence » et « de réserve » et leurs caractéristiques radiologiques et chimiques, l'ASN a demandé que l'examen de l'IRSN inclue :

- la démarche d'élaboration de ces inventaires ;
- les caractéristiques des colis de déchets, notamment radiologiques, chimiques et thermiques, et la pertinence des incertitudes associées retenues pour l'évaluation de sûreté ;
- les chroniques de mise en stockage des colis.

Par ailleurs, l'ASN [2] a demandé à la Présidente du Groupe permanent d'experts (GPE) pour les déchets (GPD) l'avis du groupe d'experts qu'elle préside sur ce premier groupement de thématiques, avec l'appui en tant que de besoin de l'expertise des membres du Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et les usines (GPU) et du Groupe permanent d'experts pour la radioprotection et l'environnement (GPRP). L'ASN a précisé que chacun des groupements de thématiques identifiés ci-avant fera l'objet d'un examen par le GPD ; ces examens sont nommés « GP1 », « GP2 » et « GP3 » dans la suite du présent rapport.

En outre, la présente expertise a fait l'objet d'un dialogue technique (DT DAC Cigéo), organisé par l'Association nationale des comités et commissions locales d'information (Anccli), le Comité local d'information et de suivi du laboratoire de Bure (Clis de Bure) et l'IRSN, dans la continuité des actions d'ouverture à la société civile sur les déchets HA - MA-VL menées depuis 2012. Ce DT DAC Cigéo a pour objectifs i) de tenir compte des préoccupations et des questions de la société civile pour rendre plus robuste l'expertise de l'IRSN et ii) de permettre à la société civile de se forger sa propre opinion sur les sujets de sûreté nucléaire et de radioprotection et participer ainsi à la décision publique. Il fait l'objet d'une annexe dédiée (Annexe T1) et les principaux sujets d'intérêt pour les participants sont repérés par le pictogramme ci-contre au fil du texte du présent rapport.



Le présent rapport rappelle le contexte général de l'instruction et décrit le contenu du DDAC (chapitre 1) puis l'installation Cigéo telle que présentée dans ce dossier (chapitre 2). Il présente ensuite l'expertise par l'IRSN de ce dossier (chapitres 3 à 10) et comprend une liste des références, une liste des acronymes ainsi que des annexes administratives et techniques.

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

- **en caractères gras** sont mentionnées les conclusions de l'IRSN ;
- lorsque ces conclusions de l'IRSN ont conduit à un **engagement** de la part de l'Andra pris à l'issue de la « réunion préparatoire » à la réunion du Groupe permanent tenue le 9 février 2024, ceux-ci sont mentionnés **en caractères bleus gras sous forme d'un numéro précédé de la mention « 2024-E »**, et renvoient à la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 en Annexe A2 ;
- enfin, les conclusions qui font l'objet de recommandations en vue de la réunion des GPE figurent **en caractères bleus gras, et sont précédées d'un titre mentionnant « Recommandation N° X »**.

1.2. Contexte

La loi de programme du 28 juin 2006 [3] relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs prévoit la poursuite des études et recherches sur le stockage réversible en couche géologique profonde « *de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation prévue à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement puisse être instruite en 2015* ». Par ailleurs, l'ASN a publié le 12 février 2008 son guide de sûreté relatif au stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde, appelé ci-après « Guide n°1 de l'ASN » [4].

Le débat public préalable au dépôt du DDAC pour une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs HA et MA-VL, prévu par l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, s'est tenu du 15 mai au 15 décembre 2013. À la suite de ce débat, l'Andra a proposé une modification du calendrier de développement du projet Cigéo par délibération de son conseil d'administration du 5 mai 2014 [5], en intégrant en particulier le dépôt d'un DOS, ainsi qu'en introduisant une « phase industrielle pilote » avant le passage à l'exploitation courante de l'installation. L'ASN a précisé par lettre du 19 décembre 2014 [6] que, sur la base de ce nouveau calendrier, l'Andra remettrait en 2015 à l'Etat une proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo et à l'ASN un DOS, en préalable au dépôt du DDAC de Cigéo. La Loi n°2016-1015 du 25

juillet 2016 (dite « Longuet-Namy ») [7], précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible, modifie la loi n°2006-739 du 28 juin 2006 [3] en portant à 2018 l'instruction du DDAC, et modifie l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement en définissant la réversibilité¹ et en introduisant la phase industrielle pilote dans la réglementation. Le DOS, transmis à l'ASN par l'Andra le 6 avril 2016 [8], se positionnait entre la fin des études d'avant-projet sommaire (**APS**) et le début de celles de l'avant-projet détaillé (**APD**). Il a marqué l'entrée du projet dans un processus encadré par la réglementation relative aux installations nucléaires de base (**INB**), notamment au travers de l'article R. 593-14 du code de l'environnement.

Sur le plan de l'expertise scientifique et technique de la sûreté de Cigéo, l'ASN a pris position lors des principales étapes de développement de l'installation, en s'appuyant sur les expertises menées par l'IRSN et les conclusions des GPE. Ces étapes sont notamment le « Dossier 2005 Argile » (**Dossier 2005**) relatif à la faisabilité d'un stockage profond en couche géologique argileuse [9][10][11], le choix d'une « Zone d'Intérêt pour une Reconnaissance Approfondie » (**ZIRA**) [12][13], le « Dossier 2009 » présentant les options de conception, de sûreté et de réversibilité de l'installation de stockage [14][15][16], le jalon intermédiaire de conception au stade de l'esquisse en 2012 [17], les études remises depuis 2009 comprenant notamment les résultats de la reconnaissance par sismique 3D [20][21], les ouvrages de fermeture en 2014 [22][23][24], les risques en exploitation en 2015 [25][26][27], le plan de développement des composants du projet en 2016 [28][29] et enfin le DOS en 2018 [30][31][32]. Une synthèse des principales conclusions de ces expertises est présentée en Annexe T2 du présent rapport. L'Annexe T3 synthétise les demandes formulées par l'ASN et les engagements pris par l'Andra à l'issue de ces expertises en vue du DDAC, ainsi que leur statut, selon l'IRSN, à l'issue de la présente instruction.

Comme indiqué ci-dessus, le principe d'une phase industrielle pilote de Cigéo est inscrit dans l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement. Celui-ci dispose que l'exploitation du centre débute par une phase industrielle pilote, que l'autorisation de mise en service est limitée à cette phase et que les résultats de cette phase font l'objet d'un rapport de l'Andra. Sur la base de ce rapport, accompagné de l'avis de différents évaluateurs (**CNE**, **ASN**, **OPECST**), le gouvernement présente un projet de loi adaptant les conditions d'exercice de la réversibilité du stockage. Au regard de son importance dans le développement de Cigéo, l'échéance du bilan de la phase pilote est associée dans le présent rapport à certaines conclusions de l'IRSN. Cette échéance, susceptible de renvoyer l'évaluation des résultats des actions mises en œuvre à quelques dizaines d'années, suppose la mise en place de points d'avancement réguliers en amont de ce bilan, qui restent à définir.

1.3. Présentation du dossier de l'Andra

Par lettre DG/23.008 du 16 janvier 2023 [33], l'Andra a déposé le **DDAC** du projet Cigéo auprès de la Ministre de la Transition énergétique en charge de la sûreté nucléaire. Ce dossier est composé d'un ensemble de « pièces de base » (cf. Annexe A3), dont :

- des pièces appelées par l'article R. 593-16 du code de l'environnement contenant notamment les cartes et plans de l'installation, l'étude d'impact, la version préliminaire du rapport de sûreté, les études de maîtrise des risques, le plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance ainsi que le plan directeur d'exploitation,
- des pièces appelées par d'autres articles du code de l'environnement ou demandes des autorités, composées essentiellement de la version préliminaire des spécifications d'acceptations des colis (article D. 542-88 du code de l'environnement) et du plan de développement de l'INB de stockage (**PDIS**) (cf. [32]).

Il comprend également des « notes support » relatives à des thématiques diverses liées à un ou plusieurs des trois groupements de thématiques mentionnés *supra*, notamment les dossiers de justification des choix de conception, des notes conceptuelles thématiques ou encore les référentiels de connaissances thématiques.

¹ La réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion [3].

Ce DDAC a été complété par une documentation demandée par l'ASN lors de la réunion du 10 mai 2023 relative au cadrage de l'instruction de la demande d'autorisation de création, puis, au cours de l'instruction, par d'autres documents techniques et par les réponses apportées par l'Andra aux questions de l'IRSN.

2. DESCRIPTION DE CIGEO

Le présent chapitre, exclusivement descriptif, est dédié à la présentation générale de Cigéo réalisée sur la base des éléments transmis par l'Andra dans le DDAC et au cours de l'instruction. Il concerne le site, l'architecture de Cigéo, les colis qui lui sont destinés, ses phases de vie, sa fermeture et son adaptabilité.

2.1. Le site de Meuse/Haute-Marne

2.1.1. Cartographie du site

La formation géologique du Callovo-Oxfordien (COX) retenue pour l'implantation de Cigéo est située sur le site de « Meuse/Haute-Marne » (MHM), en bordure orientale du bassin sédimentaire de Paris. Ce site est encadré par des failles présentant des décalages verticaux de plusieurs dizaines de mètres, en particulier les failles de la Marne à l'ouest et de Gondrecourt à l'est. Au nord, les couches forment le synclinal de Savonnières, une cuvette de faible amplitude allongée est-ouest. Au sud-ouest se trouve la « zone de fracturation diffuse » (ZFD), un faisceau de failles situé dans le prolongement des failles de la Marne, qui atteint (voire traverse pour certaines structures) les failles de Gondrecourt (cf. Figure 1). Pour le DDAC, l'Andra a mis à jour la cartographie des failles constituant la ZFD. La large zone ainsi délimitée par ces accidents tectoniques est appelée « secteur de MHM » dans la suite de ce rapport. Enfin, des failles majeures sont présentes à une distance d'environ 10 km de cette zone au nord (faisceau de failles de Metz) et au sud (faille de Vittel).

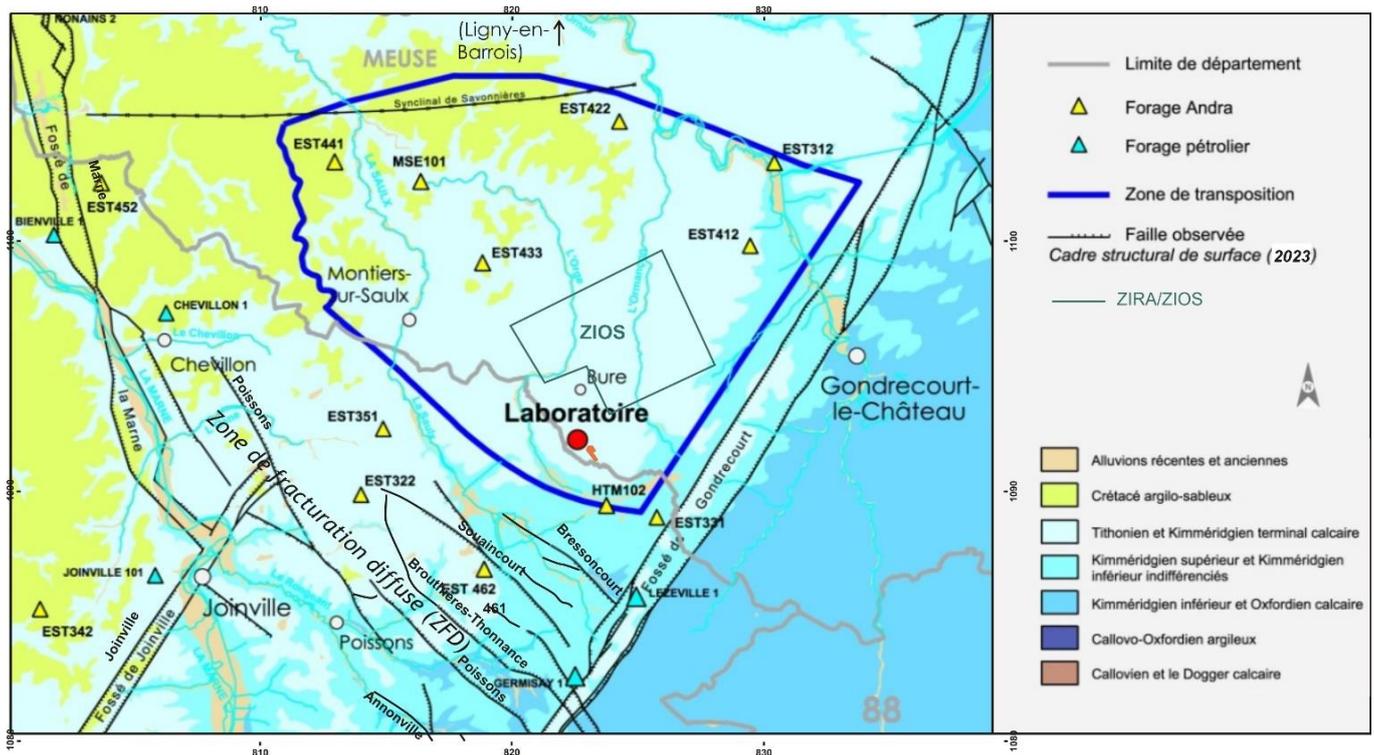


Figure 1. Carte géologique du « secteur de Meuse/Haute-Marne » et position de la zone d'implantation des ouvrages souterrains de stockage (ZIOS) dans la zone de transposition (ZT) ([34], modifié : la carte intègre la mise à jour par l'Andra de la ZFD [35])

La « zone de transposition » (ZT), d'environ 250 km², a été définie par l'Andra en 2005 comme la zone présentant des propriétés similaires à celles du Laboratoire souterrain de MHM (LSMHM). Au sein de cette ZT, l'Andra a défini en 2009 une « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (ZIRA), d'environ 30 km², pour l'implantation de l'installation souterraine et des installations en surface. Au stade du DDAC, l'Andra définit la « zone d'implantation des ouvrages souterrains de stockage » (ZIOS), correspondant au volume de roche qui

permet d'accueillir les ouvrages souterrains de Cigéo, c'est-à-dire les accès depuis la surface à la zone souterraine, puis celle-ci au sein du COX délimité par la ZIRA, comprenant les quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs et les zones de soutien logistique [36].

2.1.2. Les principales formations sédimentaires du sous-sol du site de Meuse/Haute-Marne

La formation du COX est localisée stratigraphiquement entre deux formations calcaires (formations encaissantes), présentant des niveaux aquifères : le Dogger en dessous, surmontant lui-même le Lias argileux et le Trias salifère, et l'Oxfordien au-dessus, surmonté par le semi-perméable marneux du Kimméridgien et l'aquifère superficiel des calcaires karstifiés du Barrois, d'âge Tithonien (Figure 2). Les premiers 2 000 m du sous-sol du site sont d'âge Mésozoïque.

En raison de l'inclinaison des couches en direction du centre du Bassin parisien, à l'exception des effets locaux de la topographie (incision des cours d'eau) et des décalages verticaux liés aux failles précitées, les formations à l'affleurement dans le secteur de MHM sont de plus en plus anciennes en allant vers l'est-sud-est : le Crétacé sablo-argileux est encore présent au nord-ouest de la ZT, puis ce sont les calcaires du Barrois sur l'essentiel de la surface de la ZT et le Kimméridgien sur une étroite bande sud-est. Les calcaires de l'Oxfordien affleurent au-delà des failles de Gondécourt, puis, plus au sud-est encore, le COX argileux et les calcaires du Dogger.

Les couches sous-jacentes au Mésozoïque, d'âge Paléozoïque, sont mentionnées pour leur éventuel intérêt en termes de ressources naturelles (cf. chapitre 5.2 du présent rapport). Elles sont notamment composées par :

- le bassin du Permien, situé entre environ 2 000 et 4 000 m de profondeur et correspondant à des alternances de roches détritiques altérées, avec notamment des conglomérats et des couches argileuses compactées ;
- le « Bassin sarro-lorrain » du Carbonifère, situé entre 4 000 et 5 500 m de profondeur, constitué d'un bassin d'âge Stéphanien pauvre en charbon et schistes d'au moins 1 500 m d'épaisseur, surmontant, probablement seulement sur une partie du site, un bassin d'âge Westphalien constitué de couches riches en lits de charbon à plus de 5 500 m de profondeur.

2.1.3. La couche du Callovo-Oxfordien

La formation du COX est une couche sédimentaire compactée, communément appelée « argilites du COX », essentiellement composée d'argiles (en moyenne 40-45 %) et de carbonates (en moyenne 20-40 % ; essentiellement de la calcite) contenant une petite quantité de quartz [37]. Le COX présente une épaisseur comprise entre 130 m au sud-ouest et 162 m au nord-est au sein de la ZT et entre 142 et 162 m au sein de la ZIOS (Figure 1). Sur la ZIOS, la couche est légèrement inclinée avec un pendage d'environ 1,5° vers le centre du Bassin parisien, soit vers l'ouest-nord-ouest ; son toit est situé entre environ 340 et 530 m de profondeur (≈ 443 m au niveau des puits) et son mur entre environ 500 et 675 m dans l'emprise de la ZIOS (≈ 594 m au niveau des puits) [36].

Le COX est constitué de quatre séquences sédimentaires C2a à C2d de bas en haut (Figure 2) [37], formées en raison des variations du niveau marin, rassemblées en grandes unités géologiques :

- l'unité argileuse (**UA**) est la plus épaisse (100 à 120 m) et la plus homogène en termes de composition minéralogique, à dominante argileuse (plus de 40 % d'argiles). Elle peut être scindée en trois sous-unités, UA1, UA2 et UA3 (Figure 2) : UA1 correspond à la séquence C2a, constituée (après un biseau basal) d'une argile silteuse, puis UA2 et UA3 correspondent à la séquence C2b, qui commence par UA2 avec de minces passées carbonatées constituant le repère inférieur oolithique (**RIO**), passe au maximum d'argilosité de la formation (**IMA**), unité dans laquelle les ouvrages de stockage seront implantés, et se termine par UA3 légèrement moins argileuse ;

- l'unité de transition (**UT**) correspond à la partie inférieure de la séquence C2c. Plus carbonatée et plus variables latéralement, elle présente, sur une quinzaine de mètres, des propriétés minéralogiques et pétrophysiques intermédiaires entre les unités sous-jacente et sus-jacente ;
- l'unité silto-carbonatée (**USC**) d'environ 30 m d'épaisseur, présente des niveaux lithologiques contrastés, de teneur variable en carbonates (de 20 à 80 %) et/ou en tectosilicates (de 10 à 50 %), avec un enrichissement progressif en carbonates vers le haut. La sous-unité USC1 correspond à la partie supérieure de la séquence C2c composée d'alternances de siltites carbonatées et de marnes ; la séquence C2d est plus carbonatée à la base, ce qui constitue le repère supérieur oolithique (**RSO**), puis est constituée de siltite carbonatée correspondant à USC2.

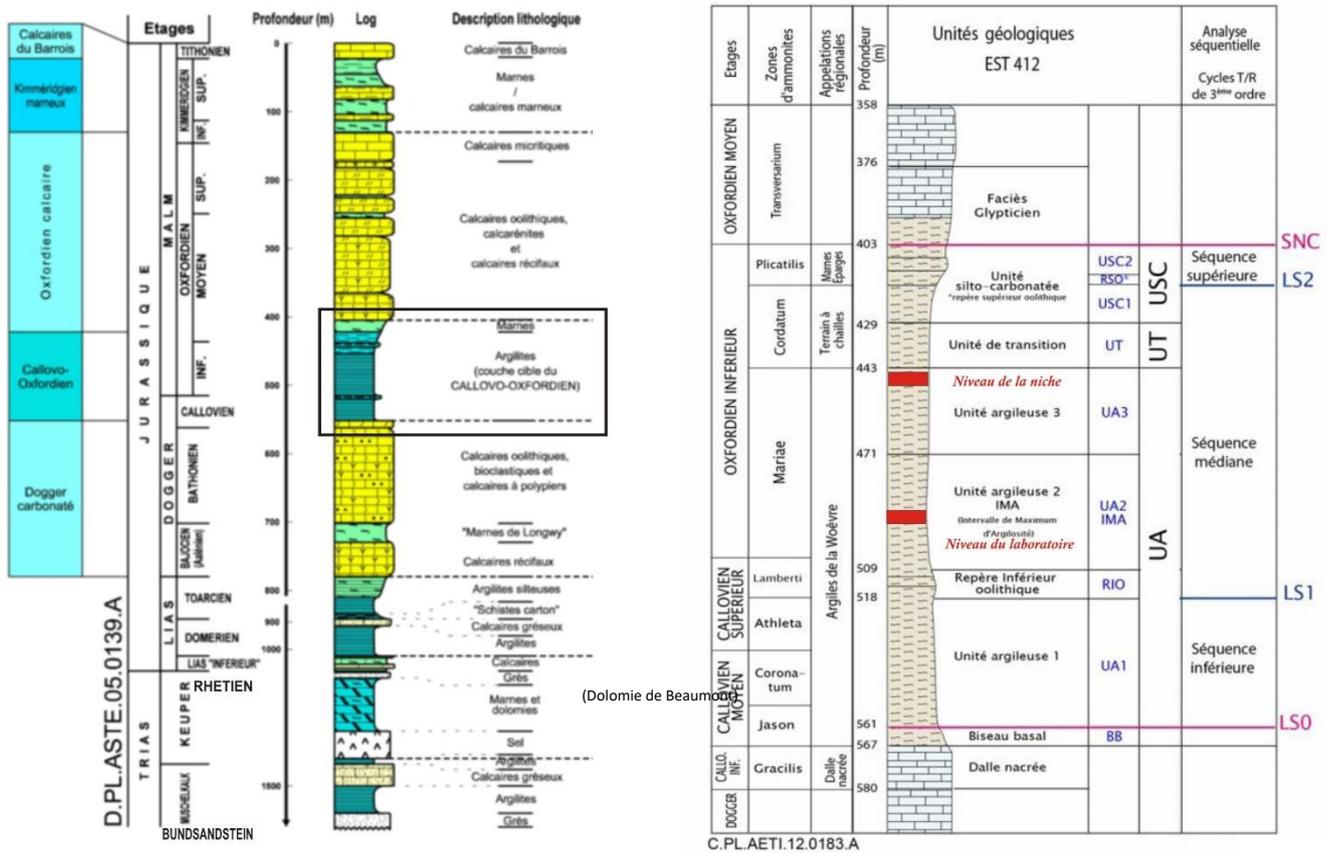


Figure 2. Logs des principales formations géologiques du secteur de Meuse/Haute-Marne. À gauche : couches du Mésozoïque ([37], modifié). À droite : détail de la formation du COX au niveau du LSMHM ([37], modifié).

Au sein de la ZT (Figure 1), l'Andra considère que la formation du COX présente une grande continuité lithologique latérale de ces séquences et unités, expliquée par des conditions calmes de dépôt des argilites qui la constituent. Sur la base des données acquises en forages, l'Andra indique que les propriétés mécaniques, hydrogéologiques et de transfert de l'UA varient peu au sein de la ZIOS. Ainsi, les données de forages indiquent que, dans l'UA, les proportions d'argiles, de silts et de carbonates ne varient latéralement que de 1 à 2 % sur toute la ZT. Dans l'UT et l'USC, la variabilité minéralogique est plus marquée mais limitée : la proportion d'argiles diminue d'environ 10 % (passant approximativement de 40 à 30 %) au profit des silts de l'ouest-sud-ouest vers l'est-nord-est de la ZT dans l'UT, et diminue jusqu'à 15 % dans la même direction au profit des carbonates [34] dans l'USC.

2.1.4. Les niveaux aquifères principaux du site de Meuse/Haute-Marne

L'aquifère à surface libre du Barrois est de type karstique lorsqu'il affleure dans le secteur de MHM ; il est très productif au niveau du secteur MHM lorsqu'il est saturé. Au sein de la ZIOS, son épaisseur peut atteindre 130 m.

L'aquifère de l'Oxfordien, d'environ 280 m d'épaisseur, (cf. Annexe T1 de [30]) présente une transmissivité globale comprise entre 10^{-7} et 10^{-5} m²/s et des transmissivités plus élevées comprises entre 10^{-3} et 10^{-2} m²/s dans la ZFD [34] (Figure 1). Au niveau de la ZT, les écoulements sont orientés vers le nord-ouest avec un gradient hydraulique d'environ 0,4 %. Cet aquifère présente une alternance entre des niveaux peu producteurs (voire non producteurs) et plus producteurs. Dans la partie nord-est du secteur, la nappe de l'Oxfordien est divisée par des couches marneuses appelées « Série grise » [34], séparant certains des horizons producteurs précités.

L'aquifère calcaire du Dogger, d'environ 250 m d'épaisseur, présente une transmissivité globale comprise entre 10^{-9} et 10^{-5} m²/s et des transmissivités plus élevées comprises entre 10^{-6} et 10^{-4} m²/s dans la ZFD [34]. Les écoulements sont également orientés vers le nord-ouest avec un gradient plus faible que dans l'Oxfordien, de l'ordre de 0,1 %. Le Bathonien constitue le principal ensemble producteur dans le Dogger et surmonte le Bajocien, constitué de la couche des Marnes de Longwy au-dessus d'un niveau très faiblement producteur (cf. Figure 2).

Le gradient hydraulique vertical à travers le COX, résultant des différences de charge entre l'Oxfordien carbonaté (290 m NGF au niveau du LSMHM) et le Dogger (305 m NGF au niveau du LSMHM), varie entre une valeur légèrement négative au sud-est de la ZIOS (gradient descendant) et d'environ 0,12 m/m au nord-ouest de cette zone (gradient ascendant) [38]. L'Andra estime que ce gradient vertical pourrait doubler en 500 000 ans en fonction des modifications géodynamiques liées à l'érosion. Par ailleurs, les mesures de charges hydrauliques dans le COX révèlent l'existence d'une surcharge par rapport à la différence de charges entre l'Oxfordien et le Dogger, qui peut atteindre une valeur d'environ 50 m [38].

L'examen des connaissances relatives à l'aquifère superficiel du Barrois et aux caractéristiques géotechniques de surface est présenté au chapitre 4.1 du présent rapport. Les caractéristiques géologiques, les ressources naturelles, la géodynamique et l'hydrogéologie du site font l'objet du chapitre 5. Enfin, les propriétés initiales de la roche hôte sont examinées au chapitre 6.1.

2.2. L'architecture du stockage

La demande d'autorisation de création de Cigéo porte sur un périmètre d'INB constitué de trois zones (cf. Figure 3) [39] :

- une « zone descendrière » en surface, principalement dédiée à la réception des colis de déchets radioactifs envoyés par les producteurs, à leur contrôle et à leur préparation pour le stockage avant transfert dans l'installation souterraine ;
- une « zone puits » en surface, dédiée aux installations de soutien aux activités réalisées dans l'installation souterraine et en particulier aux travaux de creusement des ouvrages ;
- la ZIOS, comprenant l'installation souterraine (quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs, « zones de soutien logistique » (ZSL) et les liaisons surface-fond (LSF).

Deux installations de surface principales de Cigéo sont situées hors périmètre de l'INB : une liaison reliant la zone puits à la zone descendrière, qui comprend un convoyeur et deux voies dédiées à la circulation des poids lourds et des véhicules légers, ainsi qu'une installation terminale embranchée en surface qui relie la zone descendrière au réseau ferré national à Gondrecourt-le-Château (Figure 1) et qui inclut une plateforme logistique dans cette commune [39].

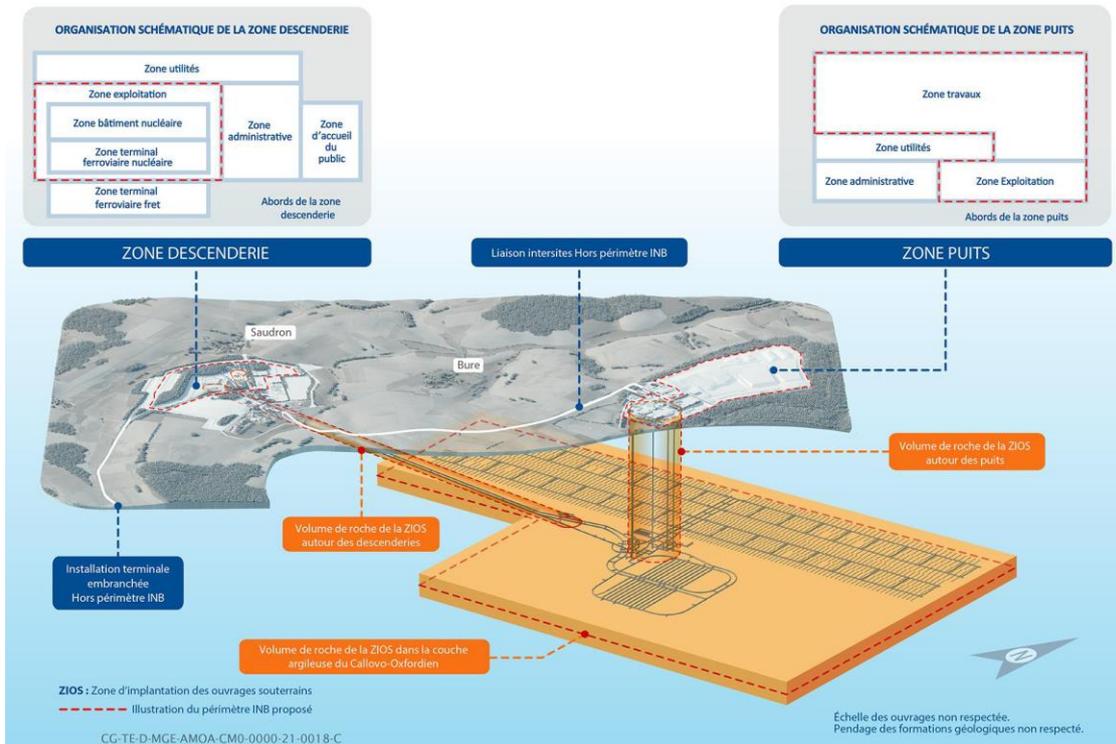


Figure 3. Schéma des installations de surface et souterraine de Cigéo [39]. En orange, la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS).

2.2.1. Installations de surface

L'Andra prévoit d'implanter les installations de surface de Cigéo sur le plateau calcaire entaillé par la vallée de la Bureau, un affluent de l'Orge, lui-même affluent de la Saulx, et la vallée de l'Ormançon, affluent de l'Ornain, qui s'écoulent globalement vers le Nord (cf. Figure 1). Ces installations sont situées dans la zone puits et dans la zone descendrière (cf. Figure 3).

2.2.1.1. Installation nucléaire en zone puits

L'INB en zone puits, située sur la commune de Mandres-en-Barrois et en limite ouest des communes de Ribeaucourt et de Bure, s'étend sur une surface d'environ 250 hectares sur le niveau médian des calcaires du Barrois (calcaires de Dommartin) [40]. Elle comprend principalement une zone dite « exploitation » sur une petite partie sud et une zone dite « travaux » occupant la surface centrale et nord :

- la zone exploitation abrite un atelier de maintenance et une zone de stockage du matériel, ainsi que les bâtiments et équipements dédiés à l'accueil et au transfert du personnel d'exploitation vers la « ZSL exploitation » (**ZSLE**) de l'installation souterraine, via le puits VFE, et à sa ventilation via ce même puits ainsi que le puits et VVE (les puits sont décrits au chapitre 2.2.2 du présent rapport) ;
- la zone travaux, dédiée aux travaux d'extension des ouvrages souterrains, comprend les bâtiments et équipements dédiés à l'accueil et au transfert du personnel « travaux » vers la « ZSL travaux » (**ZSLT**) de l'installation souterraine, via le puits VFT, et à sa ventilation, via ce même puits et le puits et VVT, ainsi que les bâtiments dédiés à l'apport et à l'évacuation de matériel et de matériaux de construction, y compris des déblais d'excavation, via le puits MMT ;
- la zone de gestion des versées, dans une large moitié nord de la zone puits, comprend les installations de traitement et le stockage de la roche excavée (« marin ») de la couche du COX.

2.2.1.2. Installation nucléaire en zone descendrie

L'Andra prévoit d'implanter la zone descendrie sur les communes de Saudron, de Bure et de Guillaumé, sur une surface d'environ 200 hectares, sur le niveau constituant la base des calcaires du Barrois (calcaires sublithographiques) [40]. L'INB en zone descendrie comprend notamment la zone « terminal ferroviaire nucléaire » au sud, la zone « bâtiment nucléaire » au centre, qui rassemble le bâtiment nucléaire de surface « Exploitation Phase 1 » **EP1**, la tête de descendrie colis, et enfin la « zone exploitation » autour. Cette dernière comprend des bâtiments et équipements en support à l'exploitation de l'INB, dont la tête de la descendrie de service, les ateliers et magasins support, les ouvrages liés à la gestion des eaux et effluents et les ouvrages de protection du site.

Après expédition des convois de colis de déchets MA-VL et HA par les producteurs, essentiellement via le réseau ferré national (transport routier pour les colis MA-VL de Valduc [40]), ceux-ci sont réceptionnés dans leur emballages de transport au niveau du terminal ferroviaire nucléaire. Les colis de déchets sont déchargés verticalement dans le bâtiment nucléaire de surface EP1, sortis de leur emballage de transport, contrôlés et, le cas échéant, mis en conteneur ou en panier pour le stockage. Les colis de stockage sont ensuite mis en hotte et transférés, via un ouvrage de liaison, à la tête de la « descendrie colis » dédiée au transfert des hottes vers les ouvrages souterrains.

L'Andra retient, pour l'installation EP1, une architecture composée de bâtiments semi-enterrés (11 m de profondeur). Au-delà de la phase pilote, un bâtiment de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal (ET-H), est prévu d'être construit entre le bâtiment EP1 et la tête de descendrie. La construction et la mise en service du bâtiment nucléaire de surface **EP2**, dédié au déchargement, au contrôle et à la préparation pour le stockage des colis HA1/HA2 dits « thermiques » dont la prise en charge est prévue à l'horizon 2080, n'est envisagée au sud-est de la tête de descendrie qu'après plusieurs décennies d'exploitation.

2.2.2. Liaisons surface-fond

Les LSF [40] comprennent deux descendries et cinq puits (Figure 4), détaillés ci-après. Les dispositifs de scellement envisagés dans ces ouvrages sont décrits dans le chapitre 2.5 relatif à la fermeture du stockage.

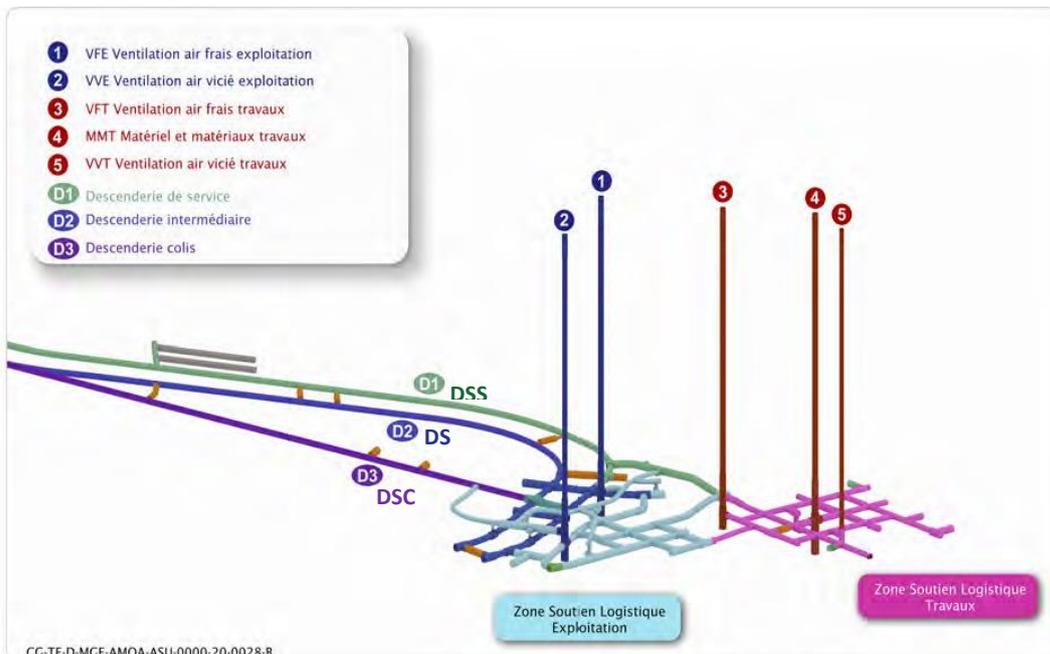


Figure 4. Illustration des liaisons surface-fond ([40], modifié).

2.2.2.1. Descenderies

Les deux tunnels qui constituent la descenderie « colis » (**DSC**) et la descenderie « de service » (**DSS**) sont inclinés d'environ 12 % et s'étendent depuis la zone descenderie en surface vers le sud-ouest [40]. Ils sont parallèles et distants d'environ 60 mètres. Ainsi qu'illustré sur la Figure 4, à partir de leur entrée dans le COX, un diverticule supplémentaire apparaît (descenderie intermédiaire (**DSI**)), et les trois tunnels convergent vers la ZSLE.

La DSC est reliée à la tête de descenderie colis, elle-même reliée à l'installation EP1. Elle est équipée d'un funiculaire qui permet de descendre et remonter les hottes dans lesquelles sont placés les colis de stockage. La DSS, reliée à la tête de descenderie de service, est dédiée au soutien à l'exploitation, au secours et permet l'accès du personnel exploitant et des visiteurs ainsi que des véhicules de secours ; elle permet le transfert des matériels et équipements de maintenance, de jouvence et la remontée des effluents et des déchets induits. Au passage du toit du COX, la DSS dessert la zone d'implantation du démonstrateur de scellement de descenderie.

La DSC est rectiligne, d'une longueur totale de l'ordre de 4 300 m jusqu'à une carrure peu avant l'entrée dans le COX. L'Andra prévoit de creuser la DSC au tunnelier pleine face (**TBM**, Tunnel Boring Machine), avec un diamètre excavé d'environ 10,4 m (diamètre utile de 9,1 m), jusqu'à cette carrure biaise, sur laquelle s'embranchent obliquement la DSI (Figure 4). Cette dernière, d'environ 1 000 m de longueur, est creusée au tunnelier et part vers le nord pour prendre une direction parallèle à la DSS. La portion de la DSC située entre la carrure biaise et l'entrée dans le COX est creusée à l'explosif avec un diamètre excavé de 10,4 m (diamètre utile de 9,3 m puis réduit à 8,4 m ; conception rigide). La descenderie DSC est ensuite creusée au brise-roche hydraulique (**BRH**) dans le COX, avec un diamètre excavé d'environ 10,8 m (même diamètre utile de 8,4 m). La DSS est entièrement creusée au TBM sur une longueur totale de l'ordre de 4 600 m, avec un diamètre excavé de 10,4 m (diamètre utile de 9,1 m puis un de 8,4 m dans le COX) [41].

L'Andra prévoit des recoupes entre les descenderies (8 entre la DSC et la DSS, 4 entre la DSI et la DSS, 1 entre la DSC et la DSI) permettant l'intervention des secours et/ou l'évacuation, creusées au BRH au sein du COX et à l'explosif en dehors [41].

Après le passage des calcaires du Barrois dans une maçonnerie totalement étanche, le corps des descenderies est conçu de façon drainante jusqu'au toit du COX. Les eaux d'infiltration sont collectées par des gouttières et dirigées vers un caniveau dans le radier. Un bulbe d'étanchéité à base de bentonite se trouve au droit de la transition Oxfordien/COX. Le long du COX, les eaux collectées dans la partie drainante continuent à être canalisées dans le radier jusqu'à l'installation souterraine [41].

Dans les descenderies, deux principaux types de revêtements sont utilisés [41] :

- pour les portions hors du COX, un revêtement dit « rigide », composé soit de voussoirs en béton² lorsque le creusement a été fait au tunnelier, soit de béton coulé recouvert de béton projeté avec boulons lorsque le creusement a été fait à l'explosif ;
- dans le COX, après creusement au BRH, un revêtement dit « bicouche » composé de voussoirs en béton et de matériaux compressibles à l'extrados, qui permettent d'absorber les déformations différées des argilites.

2.2.2.2. Puits

Cinq puits permettent de connecter la zone puits en surface aux ZSL souterraines, répartis entre la zone nucléaire et la zone travaux (cf. Figure 4), avec des diamètres utiles de 6 à 8 m et une hauteur comprise entre 520 m (puits VVT) et 560 m (puits MMT). En zone exploitation, deux puits sont présents : VFE, d'un diamètre utile de 8 m et dédié au transfert du personnel et à l'apport d'air frais, ainsi que VVE, d'un diamètre utile de 6,5 m et dédié au retour d'air vicié de la zone exploitation. En zone travaux, trois puits sont présents : VFT, d'un diamètre utile de 8 m et dédié au transfert du personnel et à l'apport d'air frais, MMT, d'un diamètre utile de 8,5 m et dédié à

² Béton C60/75 pour tous les revêtements, cf. chapitre 7.2.

l'apport et l'évacuation des matériels et matériaux de construction, et enfin VVT, d'un diamètre utile de 6 m et dédié au retour d'air vicié de la zone travaux.

Après le passage des premiers mètres du sous-sol excavés à la pelle mécanique, l'Andra prévoit de creuser ces cinq puits à l'explosif, même si elle évalue la possibilité de les réaliser au tunnelier vertical [45]. Le revêtement des puits au-dessus du COX est en béton coffré. Dans le COX, après des cales compressibles et de béton projeté et boulonné, un revêtement bicouche est posé (matériau compressible puis béton coffré [41]).

Tous les puits présentent un revêtement étanche au niveau de l'avant-puits situé dans les calcaires du Barrois et, pour limiter la communication entre les aquifères, un bulbe d'étanchéité (béton et bentonite) au toit du Kimméridgien et au toit du COX [41]. Les puits VFE, VFT, VVT et MMT comportent (à l'exception de l'avant-puits) un revêtement non étanche, avec des gouttières périphériques dirigeant l'écoulement vers des tuyaux d'évacuation verticaux descendant jusqu'au fond des puits. Le puits VVE est de conception entièrement étanche [41].

2.2.3. Installation souterraine, concepts de stockage

2.2.3.1. Principes d'architecture

L'architecture générale de l'installation souterraine est proche, dans ses grands principes, de celle retenue au stade du DOS, avec notamment [40] :

- des quartiers de stockage sur un seul niveau, afin de maximiser les gardes de COX sain de part et d'autre de l'installation ;
- une séparation physique entre les zones travaux et exploitation nucléaire ;
- deux ZSL (ZSLE et ZSLT) regroupant l'arrivée de l'ensemble des LSF, ce qui permet de limiter les différences de charges hydrauliques entre les puits et d'éviter les circulations d'eau en U au sein du stockage ;
- des quartiers de stockage distincts et à terminaison « borgne », limitant les possibilités de drainance hydraulique du stockage et donc la circulation de flux d'eau. Ces quartiers comprennent un quartier de stockage MA-VL, un quartier pilote HA et un quartier de stockage HA, placés respectivement à l'est, au nord-ouest et plus au nord des ZSL ;
- chaque quartier de stockage relié par une galerie de liaison à la ZSLE avec en son sein des galeries d'accès,
- dans chaque quartier, des alvéoles de stockage alignées « en peigne » face aux galeries d'accès et orientées selon la contrainte tectonique majeure, pour réduire l'endommagement de la roche par le creusement ;
- des longueurs significatives d'alvéoles de stockage et des alvéoles HA borgnes, favorisant le transfert des radionucléides et toxiques chimiques depuis les alvéoles de stockage par diffusion au sein du COX ;
- des scellements, en particulier ceux des LSF, hydrauliquement performants, permettant de limiter les flux d'eau au sein du stockage et d'isoler le stockage de l'Oxfordien calcaire.

La principale évolution depuis le DOS pour la zone travaux consiste en l'ajout d'une colonne (forage tubé) pour l'approvisionnement en carburant des engins de chantier. L'Andra retient également la possibilité dans le futur d'acheminer le béton depuis la surface vers la ZSLT via un forage vertical [45].

Les principales évolutions de conception depuis le DOS pour le quartier de stockage HA sont les suivantes :

- le quartier de stockage HA contient désormais quatre galeries d'accès, contre six au stade du DOS ;
- les alvéoles de stockage HA sont allongées à 150 m (100 m au stade du DOS).

S'agissant du quartier MA-VL, les principales évolutions de conception depuis le DOS sont :

- un creusement au tunnelier (cf. chapitre 2.2.3.3) des alvéoles MA-VL (au lieu d'une machine à attaque ponctuelle (**MAP**) envisagée au stade du DOS), ainsi que du pourtour du quartier MA-VL ;
- une section excavée de la partie utile de l'alvéole (et de la cellule de manutention) de l'ordre de 85 m² (au lieu de 65 m² au maximum au stade du DOS), augmentant la capacité de stockage d'un alvéole et par conséquent, un nombre d'alvéoles réduit à une vingtaine (au lieu d'une cinquantaine) et un quartier moins grand.

La conception de l'architecture souterraine prévoit aussi l'intégration de démonstrateurs et d'alvéoles témoins qui ont été précisés depuis le DOS :

- deux démonstrateurs de scellement, l'un en descenderie et l'autre en galerie (cf. chapitre 2.5, Figure 15) ;
- un alvéole démonstrateur représentatif d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL (cf. Figure 5 ci-dessous) construit dans le quartier de stockage MA-VL lors de la réalisation de la première tranche ;
- un démonstrateur d'alvéole HA de grande longueur (150 m), dans la ZSLT (cf. chapitre 2.2.3.4, Figure 8) ;
- la possibilité de mettre d'autres démonstrateurs à proximité de la ZSLT ;
- des alvéoles témoins en cohérence avec la stratégie de surveillance retenue (évaluée dans le cadre du GP2).

Au stade du DDAC, les surfaces occupées par les quartiers de stockage HA et MA-VL de l'inventaire de référence sont d'environ 8 km² et 1,5 km² respectivement. Cette architecture laisse ainsi des emplacements de la ZIOS vacants au-delà du quartier MA-VL (jusqu'à la bordure est de la ZIOS) et au-delà du quartier de stockage HA (bordure nord de la ZIOS).

La ZSLE dessert les différents quartiers de stockage décrits précédemment *via* des galeries de liaison. La profondeur moyenne d'implantation de l'installation souterraine présentée dans le DDAC est de 525 m, bien que le niveau d'implantation du stockage, situé près du plan médian de la couche [40], ne soit pas encore définitivement fixé dans la couche du COX [48]. L'Andra indique qu'il doit être tel qu'une garde de roche saine de 50 m soit préservée de part et d'autre des ouvrages, tout en respectant les exigences liées à la pente des galeries [40]. Ainsi que précisé au cours de l'instruction, le niveau d'implantation présente une légère pente qui tend à suivre le pendage du COX. Dans la direction nord-nord-ouest, la galerie de liaison HA a une pente d'environ 2,5 % et les galeries de liaison MA-VL ont une pente inférieure à 1 %. Dans la direction est-nord-est, les galeries d'accès aux alvéoles HA ainsi que celles du quartier MA-VL ont une pente quasiment nulle.

L'Andra prévoit des zones de « carrefours dénivelés », où des galeries se superposent, notamment :

- la galerie de retour d'air de la zone MA-VL passant au-dessus des galeries de liaison exploitation accédant au quartier MA-VL ;
- la galerie évacuation et secours de la ZLSE passant au-dessus des galeries de liaison exploitation accédant aux quartiers pilote et stockage HA ;
- le plenum de ventilation de la ZSLE passant au-dessus de plusieurs galeries et recoupes de la ZSLE.

2.2.3.2. Les zones de soutien logistique

La ZSLE occupe une position centrale dans le processus de stockage des colis, qui sont réceptionnés à la gare basse du funiculaire de la descenderie colis puis transférés vers un chariot qui les orientent vers les galeries de liaison des quartiers HA ou MA-VL par l'intermédiaire de quatre tables tournantes disposées aux carrefours d'un carrousel. Pour rappel, la ZSLE comporte également les deux puits VFE et VVE [40].

La ZSLT permet le passage des personnels et des flux d'air ainsi que de matériaux entrants (voussoirs, bétons, armatures, graves et autres composants utiles à la construction) et sortants (marinage, déchets de construction) dédiés à la construction des ouvrages, notamment des « tranches ultérieures » (après la phase pilote). Pour cela,

la ZSLT accueille les trois puits MMT, VVT et VFT et dessert les galeries travaux et de retour d'air des quartiers de stockage [40].

Les ZSL contiennent différents types d'ouvrages [40] :

- les deux galeries de liaison réalisées dans le prolongement du creusement des descenderies service et colis, desservant les zones sud et nord du quartier de stockage MA-VL ;
- les deux autres galeries du quartier rectangulaire formant le carrousel de la ZSLE ;
- la gare basse au pied de la descenderie colis ;
- les galeries évacuation/secours vers les descenderies ;
- les locaux ou niches techniques (électriques, de zone vie et secours, de stockage et maintenance des matériels, de froid et pour la ZSLT, stockage de véhicules, carburant, lavage, béton projeté, charge des batteries) ;
- les galeries entre ces ouvrages ;
- les plénums de ventilation soufflage et extraction, creusés au-dessus des galeries et reliés à celles-ci par des puits verticaux ;
- les démonstrateurs en ZSLT (cf. ci-dessus).

Seules les deux galeries de liaison de la ZSLE entre les DSC et DSS et le quartier MA-VL sont creusées au tunnelier. Pour celles-ci, le diamètre utile est de l'ordre de 8,4 m et le revêtement est de type « bicouche » (cf. chapitre 2.2.2.1). Tous les autres ouvrages des ZSL sont creusés au BRH avec une section pseudo-circulaire et, pour la plupart, un revêtement de type « souple ».

2.2.3.3. Quartier de stockage et alvéoles MA-VL

S'agissant du quartier de stockage MA-VL, l'Andra retient le principe de deux galeries de liaison desservant l'ensemble des alvéoles MA-VL (voir Figure 5), chaque alvéole possédant une galerie d'accès (**GAC**) qui la relie à une galerie de liaison. Le quartier de stockage MA-VL est conçu pour comporter, à terminaison, environ vingt alvéoles. Les alvéoles de stockage MA-VL sont orientés selon la contrainte tectonique horizontale majeure afin de limiter l'endommagement de la roche lors du creusement. L'Andra prévoit de les creuser mécaniquement, à l'aide d'un tunnelier à attaque ponctuelle (**TAP**) ou d'un tunnelier pleine face « rétractable » (**TBMr**) [45] et de les soutenir par des voussoirs avec matériau compressible. Au stade du DDAC, la galerie d'accès et la cellule de manutention ont un diamètre excavé de 12,50 m et la partie utile de l'alvéole de 10,4 m (diamètre utile 8,4 m). En bout d'alvéole, les jonctions de retour d'air, connectées à la galerie de retour d'air (cf. Figure 6), ont un plus petit diamètre (excavé 7,6 m, utile 3,7m) et sont creusées comme la galerie d'accès par une méthode conventionnelle (MAP...) et soutenues dans un premier temps par du béton projeté et des boulons ou des cintres puis par un revêtement constitué de matériau compressible et de béton coulé en place.

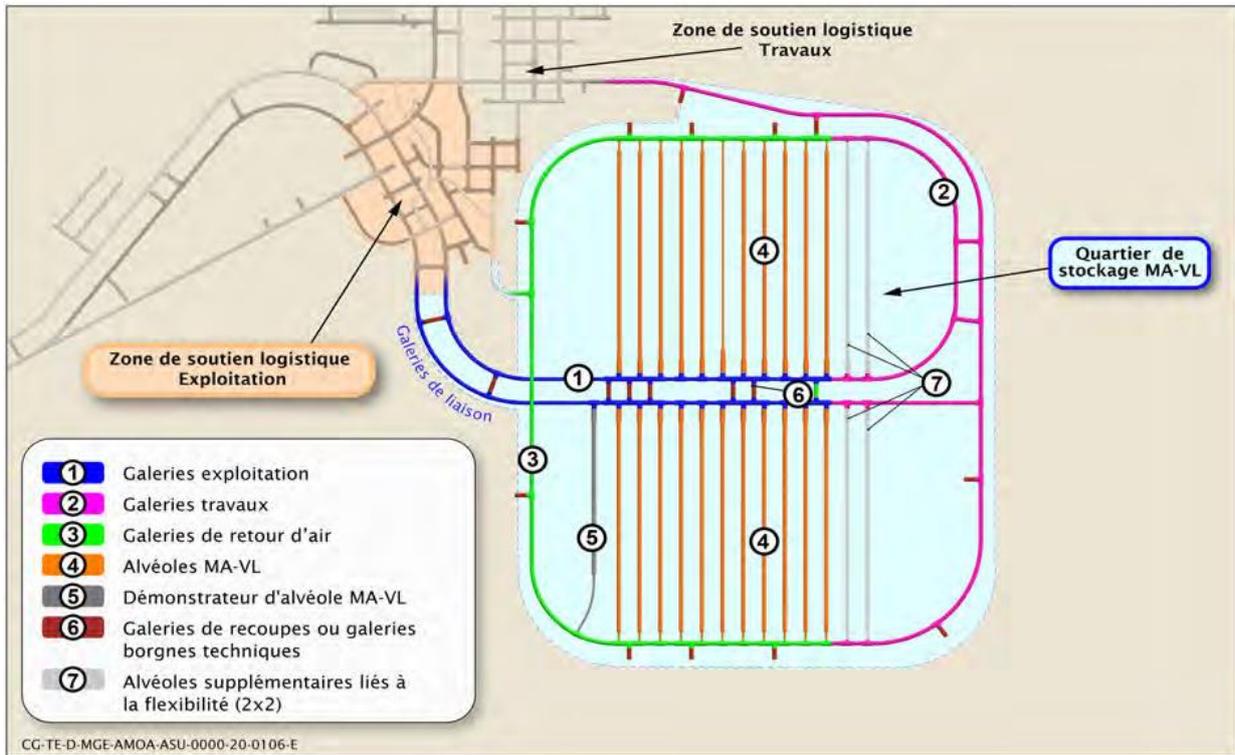


Figure 5. Illustration de la zone de stockage MA-VL [40].

Les alvéoles MA-VL, illustrés en Figure 6, sont constitués d’une zone d’accostage destinée à recevoir la hotte pour le déchargement des colis, d’une cellule de manutention, d’une partie utile pour le stockage des colis et d’une jonction de retour d’air servant à la ventilation de l’alvéole. Leur longueur totale est d’environ 600 m pour une partie utile jusqu’à 500 m environ ; elles sont espacées d’environ 50 m. La pente de la partie utile des alvéoles de stockage MA-VL est de l’ordre de 1 %.

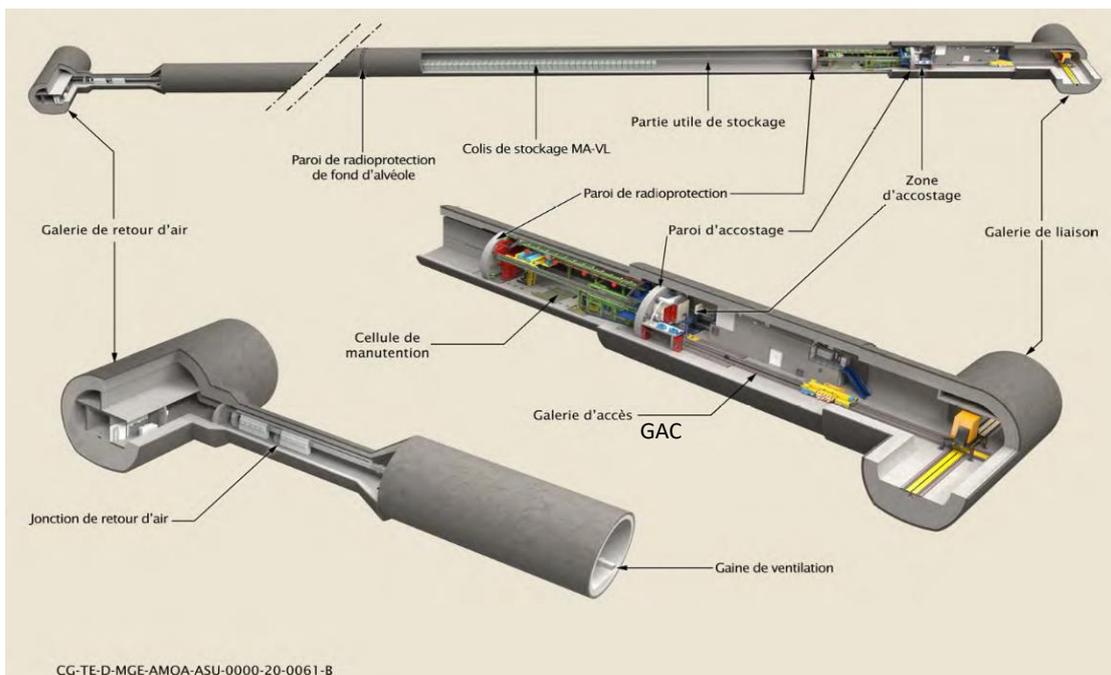


Figure 6. Illustration des différentes parties d'un alvéole MA-VL [40].

Les colis de stockage sont placés dans la partie utile des alvéoles sur un, deux ou trois niveaux et une, deux ou trois rangées en fonction du type de colis de stockage. Des exemples sont présentés en Figure 7.

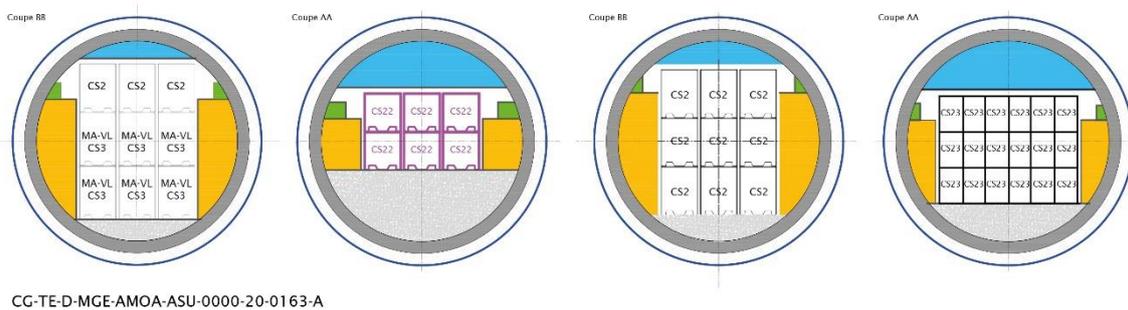


Figure 7. Exemples de sections d'alvéoles MA-VL [40].

Le stockage des colis de déchets MA-VL est actuellement envisagé de la façon suivante dans les quatre premiers alvéoles MA-VL mis en service pendant la phase pilote :

- un alvéole de stockage pour des colis de déchets MA-VL de type coque béton fibre (CBF-C'2), sans conteneur de stockage ;
- un alvéole pour des colis de déchets MA-VL de type conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C), sans conteneur de stockage ;
- un alvéole pour des colis de déchets MA-VL de type conteneurs standards de déchets compactés (CSD-C), mis en conteneurs de stockage en béton ;
- un alvéole pour les colis de déchets MA-VL de type coques et embouts cimentés (**CEC**), conteneurs amiante ciment (**CAC**) et CSD-C, mis en conteneur de stockage en béton (co-stockage géométrique).

2.2.3.4. Quartiers pilote et de stockage HA, alvéoles HA0 et HA1/HA2

Le quartier pilote HA est destiné à recevoir des colis HA parmi les moins exothermiques. Le quartier de stockage HA sera conçu, construit et exploité plusieurs dizaines d'années après la mise en service lors de la phase pilote (exploitation aux alentours de 2080) sur la base du retour d'expérience de l'exploitation du quartier pilote.

Le quartier pilote HA comporte jusqu'à une vingtaine d'alvéoles. Trois alvéoles témoins sont positionnés au sein du quartier pilote HA et un démonstrateur de fermeture d'un alvéole est prévu au fond du quartier (à l'ouest après la recoupe entre galerie d'accès et galerie d'évacuation/secours).

Les colis HA sont transférés vers le quartier pilote HA par la galerie de liaison nord-sud partant du carrousel situé dans la ZSLE, puis jusqu'aux alvéoles par une galerie d'accès partant vers l'ouest, comme illustré sur la Figure 8. A l'est de la galerie de liaison et parallèle à celle-ci se trouvent une galerie dédiée à l'évacuation et au secours puis une galerie de liaison travaux, toutes deux connectées d'un côté à la ZSLT et de l'autre à la galerie d'évacuation/secours formant la bordure nord du quartier [40].

L'Andra prévoit de prolonger ces trois galeries de liaison vers le nord après la phase pilote pour desservir le quartier de stockage HA. Le déploiement de ce quartier est planifié en quatre sous-quartiers exploités les uns après les autres dans le sens horaire, depuis le sous-quartier sud-ouest jusqu'au sud-est (Figure 8). Le quartier de stockage HA est prévu pour accueillir, après 2080, environ un millier d'alvéoles dédiés principalement au stockage des colis de déchets vitrifiés fortement exothermiques (colis HA1/HA2). À la différence du DOS où les intercalaires étaient constitués de colis factices, au stade du DDAC, le quartier de stockage HA est également prévu pour accueillir des colis HA0 (la totalité était envisagée d'être stockée dans le quartier dédié) et des colis MA-VL de déchets vitrifiés (leur stockage était envisagé en quartier MA-VL) en intercalaires ; les autres intercalaires entre colis de stockage HA sont constitués d'espaces vides.

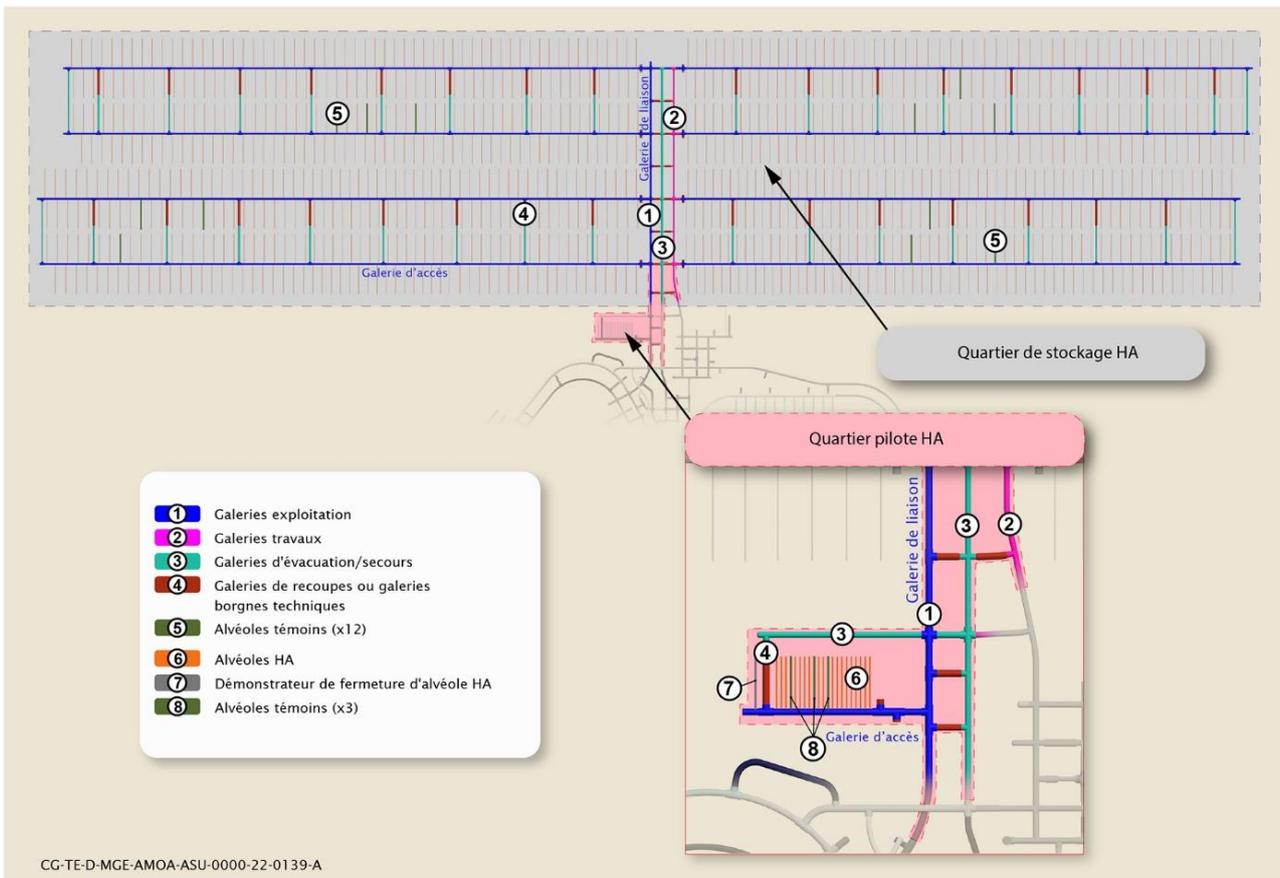


Figure 8. Illustration du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA à terminaison [49].

Les alvéoles de stockage HA (Figure 9) sont des micro-tunnels borgnes montants en pente légère (de l'ordre de 2 %) afin de drainer passivement les eaux de ruissellement, creusés selon la contrainte mécanique horizontale majeure au micro-tunnelier, avec un diamètre de l'ordre de 80 cm et une longueur de 80 m environ [50] pour les alvéoles du quartier pilote, et 150 m pour le quartier de stockage HA [40]. Un chemisage d'environ 66 à 76 cm de diamètre selon le gabarit des colis de stockage est mis en place après creusement. Il est constitué de tronçons de tubes cylindriques en acier à bas carbone API 5L X65, épais de 25 mm, emboîtés et étanches *a minima* lors de l'injection du matériau de remplissage de l'espace annulaire (**MREA**). L'espace annulaire entre le chemisage et les argilites du COX est rempli par ce matériau sous forme de coulis à base de ciment, afin d'imposer des conditions d'environnement limitant la corrosion. Le chemisage est équipé de centreurs destinés à faciliter la mise en place du MREA entre le chemisage et la roche. Ainsi que précisé au cours de l'instruction, ces centreurs sont fabriqués en acier de construction S235 JR et sont soudés directement sur le chemisage.

Outre la partie utile au stockage, l'alvéole est composée d'une tête d'alvéole, constituée d'une façade d'accostage en béton en paroi de la galerie, d'un insert en acier dans lequel s'enquille le chemisage du corps de l'alvéole et d'un tronçon destiné à recevoir divers équipements tels qu'une bride de fermeture amovible avant remplissage de l'alvéole, un bouchon de radioprotection d'exploitation pendant la phase de chargement puis, lorsque l'alvéole est pleine, un bouchon de fermeture constitué de quatre conteneurs, dans l'attente de la fermeture définitive du quartier (cf. chapitre 2.5.2 relatif à la fermeture des alvéoles). L'alvéole est équipé de dispositifs liés aux fonctions de surveillance et de gestion de l'atmosphère interne et des eaux d'exhaure associées.

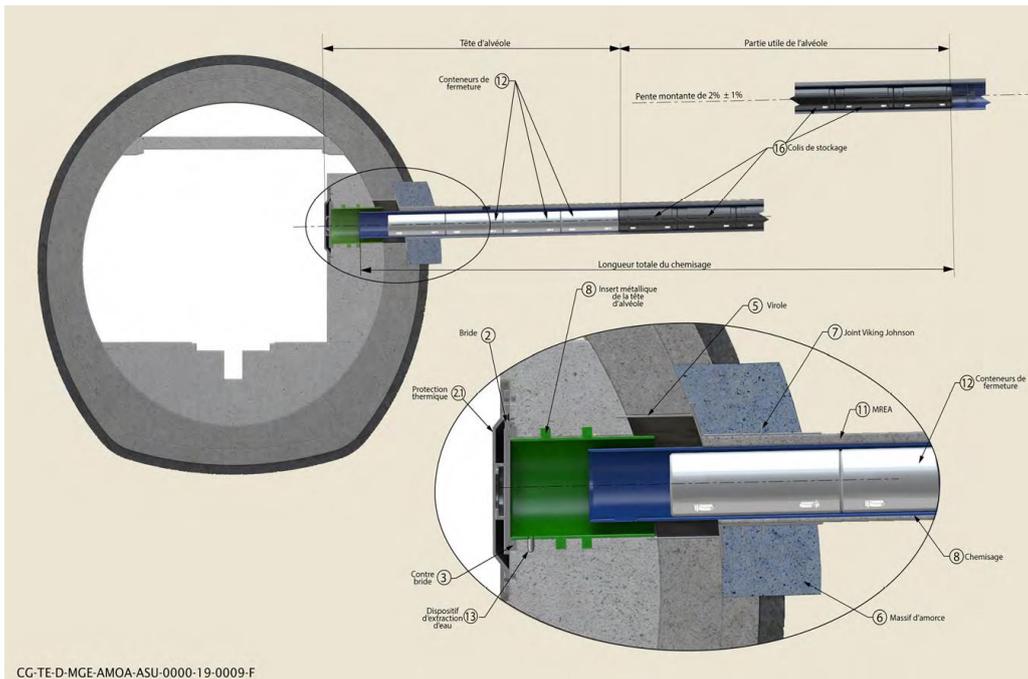


Figure 9. Illustration d'un alvéole HA après mise en place du bouchon de fermeture provisoire [40].

2.3. Inventaire de référence et colis de déchets

L'inventaire de référence en colis de déchets HA et MA-VL, sur lequel s'appuient les études de conception de l'installation présentées dans le DDAC de Cigéo, est défini à partir des colis de déchets déjà produits ainsi que des prévisions de production établies dans le cadre de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN). Quatre scénarios industriels prospectifs, **SR1**, **SR2**, **SR3** et **SNR**, sont présentés dans l'édition 2018 de l'IN. Le scénario SR2 (Tableau 1) correspond à l'inventaire de référence ; il est à distinguer des autres scénarios, notamment les scénarios SR1 et SNR qui fondent l'inventaire de réserve en vue des études d'adaptabilité (cf. chapitre 2.6 du présent rapport). Les scénarios industriels prospectifs utilisés pour établir ces inventaires sont décrits plus avant au chapitre 3.1.

Tableau 1. Scénarios de l'édition 2018 de l'IN.

	SR1	SR2	SR3	SNR
Poursuite ou arrêt de la production électronucléaire	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 ans et 60 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement de 50 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 ans et 60 ans)	Arrêt au bout de 40 ans (sauf EPR au bout de 60 ans)
Type de réacteurs déployés dans le futur parc	EPR puis RNR	EPR puis RNR	EPR	/
Retraitement des combustibles usés	Tous : UNE, URE, MOX et RNR	Tous : UNE, URE, MOX et RNR	UNE seuls	Arrêt anticipé du retraitement des UNE

L'inventaire de référence est ainsi constitué des colis de déchets produits et à produire, essentiellement par EDF, Orano et le CEA, pendant l'exploitation (sur 50 ans pour les réacteurs d'EDF) et le démantèlement de l'ensemble des installations nucléaires (réacteurs, usines, etc.) en fonctionnement ou ayant obtenu leur décret d'autorisation de création avant 2016. Il est détaillé au chapitre 3.2 du présent rapport.

Le colis de stockage, destiné à être transféré dans l'installation souterraine de Cigéo, correspond à l'ensemble formé par un ou plusieurs colis primaire(s) mis en conteneur de stockage ou, dans le cas du stockage direct, au colis primaire seul. Le colis primaire correspond au déchet, le plus souvent enrobé dans une matrice d'immobilisation ou de confinement, entouré d'un conteneur primaire. Les colis sont présentés dans l'inventaire de référence par familles, qui regroupent des colis présentant des caractéristiques similaires, à une échelle nécessaire pour mener les études sur Cigéo (procédé de fabrication, contenu radiologique et chimique, puissance thermique, etc.).

Pour ce qui concerne les conteneurs de stockage, l'Andra indique que le choix d'en minimiser la variété simplifie les opérations de manutention des colis et facilite l'automatisation du processus de mise en stockage. Les familles de colis de déchets HA et MA-VL sont donc associées à un nombre limité de types de conteneur de stockage, conçus en fonction des caractéristiques des colis primaires, notamment leur nature, leur géométrie et leur masse.

2.3.1. Les colis de stockage HA

Les déchets HA sont principalement (99,4 %) des déchets issus du traitement des combustibles usés des centrales nucléaires, vitrifiés. Ils sont répartis en 19 familles de colis [51].

Le colis de stockage HA est composé d'un conteneur de stockage étanche contenant un ou deux colis primaires. L'Andra retient six modèles de conteneurs de stockage HA, de forme cylindrique, qui se composent d'un corps constitué d'une virole, d'un fond soudé d'une épaisseur adaptée à celle de la virole et d'un couvercle de forme convexe (limitant la surface de contact entre les colis de stockage en alvéoles) muni d'une gorge de manutention, tous trois réalisés en acier à bas carbone non allié (nuance P 285 NH [52]). Quatre patins en céramique sont prévus sur le corps du conteneur de stockage pour éviter un contact direct acier/acier entre le colis de stockage et le chemisage de l'alvéole. Chaque patin est maintenu par une clavette de blocage et une queue d'aronde en acier non allié identique à celui du corps du conteneur et soudées sur celui-ci. Les patins facilitent le glissement du colis de stockage lors de sa mise en place et de son éventuel retrait. Du fait de sa nature non sensible à la corrosion, le patin porte l'identification du colis (gravure). La Figure 10 illustre la conception du conteneur de stockage HA adapté à un colis primaire de déchets vitrifiés provenant de l'usine d'Orano La Hague.



Figure 10. Illustration des composants d'un conteneur de stockage HA pour colis primaire de déchets vitrifiés provenant de l'usine d'Orano La Hague [51].

Les six modèles de conteneurs de stockage HA retenus à ce stade par l'Andra sont présentés en Figure 11. Leur longueur est comprise entre environ 1 et 2,2 m, leur diamètre est de l'ordre de 62 cm et leur masse, une fois le colis de stockage constitué, est comprise entre 1,2 et 2,3 t. Le corps du conteneur a une épaisseur de 65 mm sur

la partie courante et 53 mm à l'extrémité, sauf pour le modèle CS15³ (épaisseurs respectivement de 32,5 et 20,5 mm).

	CS 10-1	CS 10-2	CS 10-4	CS 13	CS 14	CS 15
Famille de déchets	Piver type I	Piver type II	Piver type IV	CSD-V	CSD	AVM
Nombre de colis primaires	2	1	1	1	1	2
Longueur hors tout	1 446 mm	1 040 mm	1 183 mm	1 588 mm	1 588 mm	2 227 mm
Ø corps hors tout	606 mm	606 mm	606 mm	616 mm	616 mm	606 mm
Ø corps conteneur	570 mm	570 mm	570 mm	580 mm	580 mm	570 mm
Épaisseur :						
Partie courante du corps	65 mm	65 mm	65 mm	65 mm	65 mm	32,5 mm
Extrémité partie courante du corps	53 mm	53 mm	53 mm	53 mm	53 mm	20,5 mm
Fond	65 mm	65 mm	65 mm	65 mm	65 mm	65 mm
Couvercle	72 mm	72 mm	72 mm	72 mm	72 mm	72 mm
Dimensions aménagement interne	h. 1 206 mm Ø 440 mm	h. 800 mm Ø 440 mm	h. 943 mm Ø 440 mm	h. 1 348 mm Ø 450 mm	h. 1 348 mm Ø 450 mm	h. 1 987 mm Ø 505 mm
Masse du conteneur de stockage	1 282 kg	950 kg	1 065 kg	1 434 kg	1 434 kg	1 160 kg
Masse du colis de stockage	1 684 kg	1 192 kg	1 313 kg	2 284 kg	2 004 kg	2 158 kg



Figure 11. Modèles de colis de stockage HA [52].

2.3.2. Les colis de stockage MA-VL

Les déchets MA-VL sont principalement des déchets de structure issus du traitement des combustibles usés (37 % des colis de déchets MA-VL), des déchets résultant du traitement des effluents liquides des installations nucléaires (38%) et des déchets technologiques activés (3 %) ou contaminés (19 %) issus de l'exploitation ou du démantèlement des installations nucléaires (pour plus de détail, cf. chapitre 3.2.3 du présent rapport). Les colis de déchets MA-VL de l'inventaire de référence sont répartis au sein de 80 familles [51].

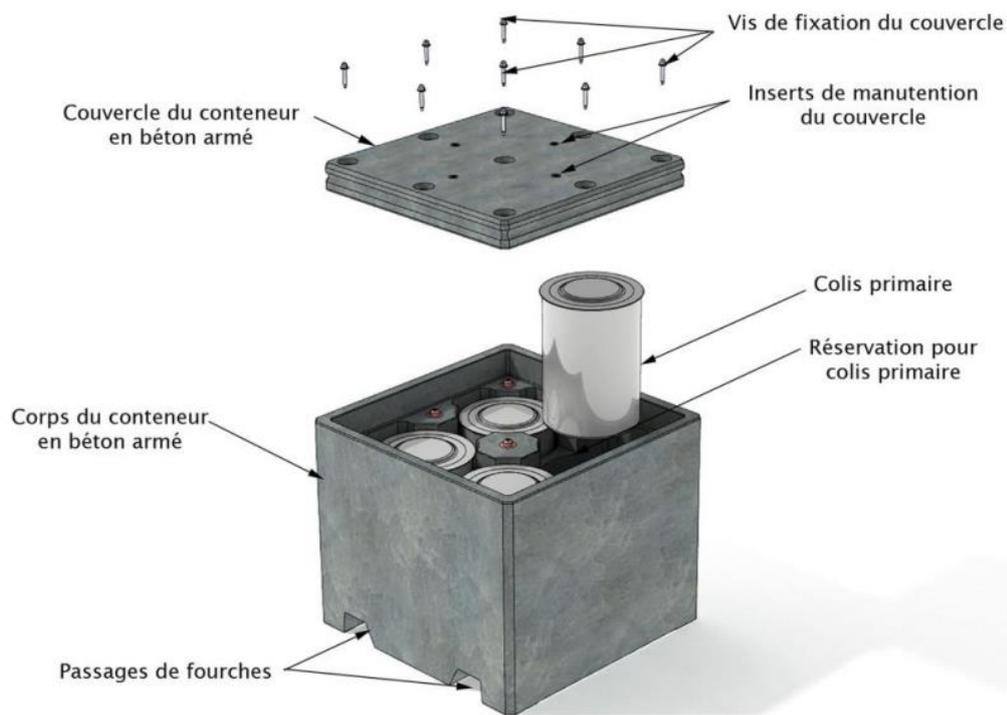
Afin de distinguer leur évolution à long terme, ils sont également classés selon 7 catégories physico-chimiques : les colis de déchets salins (MA-VL1), de déchets bitumés (MA-VL2), de déchets organiques (MA-VL3), de déchets métalliques de structure avec matrice cimentaire (MA-VL4) et sans matrice cimentaire (MA-VL5), de déchets vitrifiés (MA-VL6) et de déchets sodés (MA-VL7) [51].

Deux modes de stockage sont retenus pour le stockage de déchets MA-VL [51] :

- le stockage des colis primaires après mise en conteneur de stockage dans l'installation EP1, soit en conteneur standard avec couvercle vissé, soit en conteneur renforcé vis-à-vis du confinement avec un couvercle vissé et clavé ;
- le « stockage direct », consistant à la mise en place du colis primaire directement en alvéole de stockage soit de façon unitaire, soit en disposant plusieurs colis primaires dans un panier de stockage.

L'Andra a retenu 13 modèles de conteneurs de stockage MA-VL, rassemblés en 7 familles nommées CS1 à CS7. Les conteneurs sont de forme parallélépipédique, en béton armé pour la majorité des familles de colis (CS1 à CS5) et en acier non allié (nuance S355) pour quelques familles de colis (CS6 et CS7). S'agissant en particulier des conteneurs en béton, la solution technique retenue est l'utilisation d'éléments préfabriqués en béton armé constitués d'un corps et d'un couvercle vissé, éventuellement clavé. Des passages de fourches sont prévus sur la face inférieure pour assurer la manutention. Enfin, l'identification du conteneur est marquée à la peinture sur les quatre faces de côté [51]. La Figure 12 ci-après illustre la conception d'un conteneur de stockage MA-VL à couvercle vissé.

³ Destinés aux colis primaires AVM, moins exothermiques que la plupart des déchets vitrifiés.



CG-01-D-MGE-AMOA-CS0-7000-17-0010-A

Figure 12. Illustration des composants d'un conteneur de stockage MA-VL de type CS4.1 [51].

Les conteneurs de stockage MA-VL sont dimensionnés pour accueillir un à cinq colis primaires. Les colis de stockage MA-VL ont des dimensions de 1,28 à 2,25 m de côté et ont une masse maximale de 17 tonnes (cf. Tableau 2).

Tableau 2. Modèles de colis de stockage MA-VL [54].

	CS1	CS2.1	CS2.2	CS2.3	CS3	CS4.1	CS4.2	CS5.1	CS5.2	CS5.3	CS5.4	CS6	CS7
Longueur (mm)	2 250	1 540	1 540	1 540	1 540	2 020	2 020	1 780	1 780	1 780	1 780	2 041	2 236
Largeur (mm)	1 280	1 540	1 540	1 540	1 540	2 020	2 020	1 780	1 780	1 780	1 780	2 041	2 236
Hauteur (mm)	1 650	2 035	2 035	2 035	2 250	1 650	1 650	2 035	2 035	2 035	2 035	1 831	1 984
Épaisseur minimale de béton du corps et du couvercle (mm)	160	160	160	160	160	200	200	160	160	160	160	-	-
Épaisseur des plaques d'acier (mm) :													
1. Fond externe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8
2. Fond interne	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10
3. Parois latérales et couvercle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5
Nombre de réservation	2	1	4	1	1	4	5	1	1	1	4	1	1
Nombre de vis du couvercle	6	4	5	4	4	9	8	4	4	4	5	36	52
Masse conteneur de stockage (kg)	8 466	8 418	9 652	8 645	8 638	11 848	14 491	13 005	11 610	10 280	12 336	5 245	3 667
Masse maximale colis de stockage (kg)	11 086	12 618	13 212	13 014	12 668	14 368	16 091	16 305	15 600	17 000	16 736	15 260	15 217

2.4. Les différentes phases de vie de Cigéo

2.4.1. Chronologie des phases de vie de Cigéo

L'Andra retient la chronologie prévisionnelle décrite ci-après, sous réserve de l'obtention de l'autorisation de création de Cigéo.

Une phase dite de construction initiale débute à la publication du décret d'autorisation de création, envisagé vers 2025-2027 [55], avec la construction des ouvrages permettant la mise en service de l'installation nucléaire (bâtiments et ouvrages de surface liés à l'exploitation d'EP1, LSF, ouvrages souterrains permettant de stocker de premiers colis de déchets, cf. Figure 13). Une fois les ouvrages construits et équipés, des essais « en inactif » sont prévus, c'est-à-dire sans colis de déchets radioactifs.

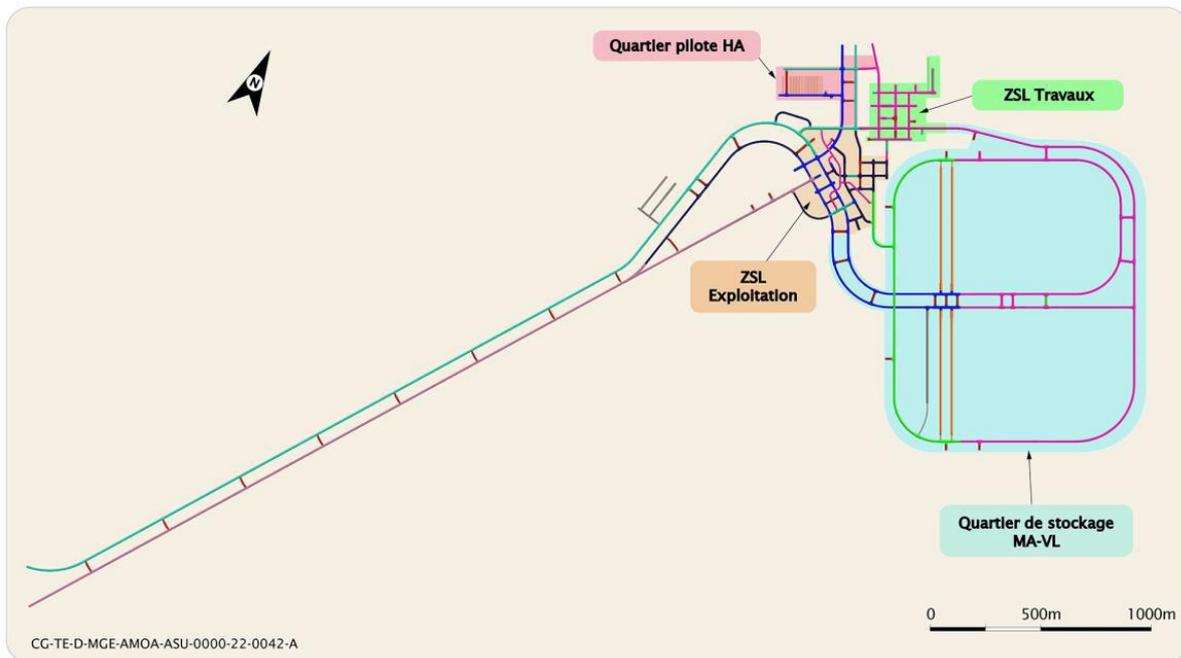


Figure 13. Illustration des ouvrages souterrains construits lors de la phase de construction initiale [55].

Après l'autorisation délivrée par l'ASN de mise en service limitée à la phase industrielle pilote, appelée « **mise en service lors de la phase pilote** » dans le présent rapport, démarre la phase de fonctionnement, qui correspond aux opérations de mise en stockage. Cette phase de fonctionnement commence par la réalisation d'essais de démarrage dits « en actif », c'est-à-dire avec des colis de déchets radioactifs. Cette mise en exploitation des premiers ouvrages est appelée « Tranche 1 » (T1) [45], par rapport aux « tranches ultérieures » (TU) de construction et de mise en exploitation. Les opérations de stockage envisagées sont les suivantes :

- stockage de colis de déchets MA-VL dans les alvéoles du quartier de stockage MA-VL construits en phase de construction initiale ;
- stockage de colis de déchets HA dans le quartier pilote HA.

La phase industrielle pilote couvre la phase de construction initiale et le début de la phase de fonctionnement. L'Andra envisage à ce stade une durée pour cette phase pilote de 15 à 25 ans. Après une loi adaptant les conditions d'exercice de la réversibilité du stockage, la phase industrielle pilote s'arrête lorsque l'ASN délivre, sur la base de cette loi, l'autorisation de « **mise en service complète** » de l'installation (Figure 14) (Article L542-10-1 du Code de l'environnement). D'autres rendez-vous de gouvernance, décisions et autorisations pourraient être définis ultérieurement.

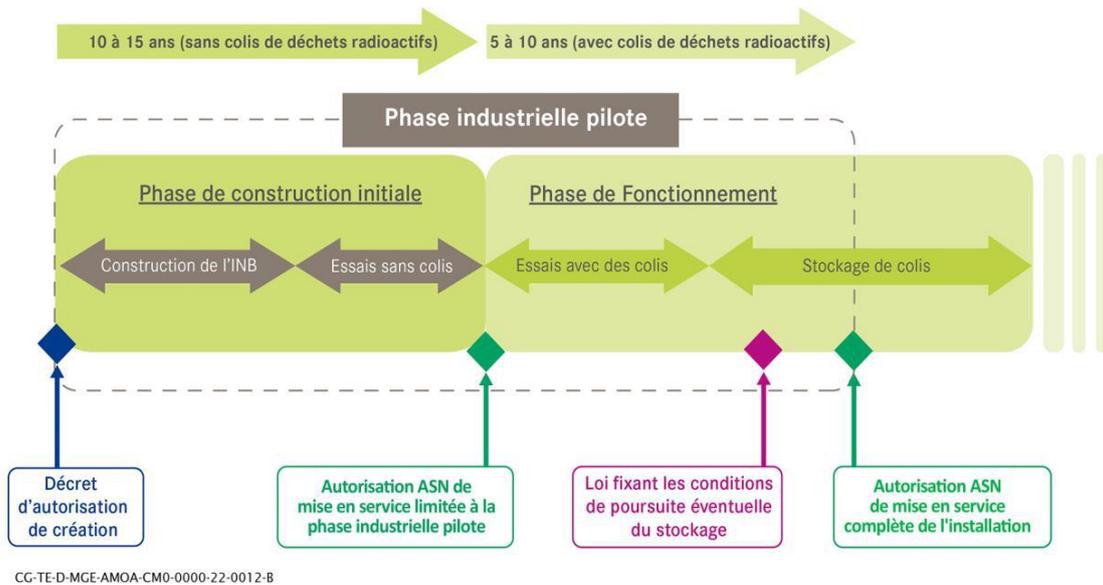


Figure 14. La phase industrielle pilote dans le calendrier de Cigéo [55].

La phase de fonctionnement se poursuit, jalonnée par des rendez-vous de gouvernance, décisions et autorisations, et se déroule sur une durée d'ordre séculaire. Durant cette phase et en parallèle des opérations de stockage, des ouvrages souterrains nécessaires au stockage sont creusés progressivement, par tranches successives [55] (TU, « tranches ultérieures »), et des travaux de rénovation, de construction ou d'adaptation des bâtiments de surface sont menés. En particulier, la construction du bâtiment nucléaire EP2 en surface est programmée à l'horizon 2080, pour réceptionner, contrôler et préparer les colis de déchets stockés dans le quartier de stockage HA. La chronologie prévisionnelle des opérations de stockage envisagées après la phase industrielle pilote est la suivante :

- pendant environ 40 ans (jusqu'à l'horizon 2080), les colis de déchets MA-VL sont mis en place dans le quartier de stockage MA-VL, dans les alvéoles construits en phase de construction initiale qui continuent d'être remplis ainsi que dans de nouvelles alvéoles. Le quartier pilote HA est en attente de fermeture ;
- pendant environ 20 ans (jusqu'à l'horizon 2100) ;
 - le stockage de colis de déchets MA-VL dans le quartier de stockage MA-VL se poursuit, le quartier pilote HA est fermé et le premier sous-quartier HA est construit ;
 - les colis de déchets HA et de déchets MA-VL vitrifiés sont mis en place dans les premiers alvéoles du quartier de stockage HA ; les autres sous-quartiers HA sont progressivement construits ;
- enfin, pendant une durée de l'ordre de 50 ans (jusqu'à l'horizon 2150), le quartier de stockage MA-VL est fermé et le stockage de colis de déchets HA et de déchets MA-VL vitrifiés se poursuit dans le quartier de stockage HA.

Dans la suite de ce rapport, la phase d'exploitation désigne la période recouvrant la phase de construction initiale et la phase de fonctionnement, y compris les fermetures partielles.

A l'horizon de 2150, après décret de démantèlement, la phase de démantèlement et de fermeture vise l'arrêt des opérations, la déconstruction des bâtiments nucléaires de surface et la mise en sécurité passive du stockage.

Après l'autorisation de fermeture et de passage en phase de surveillance, une phase de surveillance, puis une phase de « post-surveillance » constituent la période après-fermeture [55].

2.4.2. Définition de la phase industrielle pilote et enjeux associés

L'article L 542-10-1 du code de l'environnement dispose que l'exploitation de Cigéo débute par une phase industrielle pilote et fonde ses grands principes. Cette phase pilote doit permettre de conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté de l'installation, notamment par un programme d'essais *in situ* ; tous les colis de déchets doivent rester aisément récupérables durant cette phase. Par ailleurs, l'arrêté du 9 décembre 2022 établissant les prescriptions du PNGMDR stipule qu'il revient à l'Andra de proposer avant le 31 décembre 2024 les objectifs et critères de réussite de la phase industrielle pilote et de définir la nature des déchets qu'il est prévu de stocker pendant cette phase ainsi que les essais à réaliser.

Au stade du DDAC, ainsi que décrit ci-dessus (chapitre 2.4.1), l'Andra propose que la phase industrielle pilote s'organise en deux périodes : une période de construction et d'essais en « inactif », puis une période comprenant des essais de démarrage en « actif » ainsi que le stockage de colis de déchets radioactifs (voir Figure 14). L'Andra estime que ces deux périodes pourraient durer respectivement de 10 à 15 ans et de 5 à 10 ans [55]. L'Andra propose cependant que la phase industrielle pilote dure le temps suffisant pour que les enseignements qui seront jugés nécessaires à la décision du Parlement et à la préparation et à l'engagement de la poursuite de l'exploitation du projet soient consolidés [55].

Outre des apports en matière de gouvernance du centre de stockage Cigéo, l'Andra mentionne les apports techniques attendus de la phase industrielle pilote [55], sans toutefois définir de critères de réussite à ce stade, qui font l'objet de l'action du PNGMDR précitée en cours. Il s'agit de :

- conforter *in situ* les connaissances sur le milieu géologique et notamment sur la couche argileuse du COX, jusqu'ici acquises depuis la surface ou hors de la ZIOS (en forages et au LSMHM) ;
- contrôler les performances des procédés industriels de creusement en vraie grandeur, vérifier des paramètres géologiques, mesurer l'endommagement mécanique au creusement, préciser le comportement, notamment mécanique de la roche et des ouvrages ;
- construire des « démonstrateurs » d'alvéoles (HA et MA-VL), conforter la capacité à les surveiller, à maîtriser l'évolution de leur comportement dans le temps et à les exploiter ;
- construire des démonstrateurs d'ouvrages de fermeture et les étudier pendant le fonctionnement du centre de stockage Cigéo, afin d'éprouver, dès le début du projet, les conditions de réalisation des ouvrages industriels de fermeture et de disposer d'un retour d'expérience de leur comportement lors de la fermeture ;
- contrôler et éprouver progressivement le fonctionnement industriel du centre de stockage, conforter les règles et consignes d'exploitation, vérifier que les exigences de sûreté nucléaire et de sécurité sont bien respectées, etc. (démarche classique pour le démarrage d'une installation nucléaire) ;
- démontrer la capacité à retirer les colis de déchets radioactifs stockés en effectuant des opérations de retrait des colis de déchets radioactifs stockés ;
- éprouver la surveillance environnementale.

2.5. Fermeture du stockage

2.5.1. Stratégie de fermeture

A l'issue de la phase d'exploitation, l'installation sera fermée et placée en phase de surveillance. Cigéo est destiné, une fois fermé, à assurer de manière passive les fonctions de sûreté après fermeture. Dans le calendrier actuel, la fermeture définitive de Cigéo est prévue vers 2150 [56].

La fermeture de Cigéo est envisagée par étapes, potentiellement échelonnées sur toute la phase d'exploitation, depuis l'obturation des alvéoles jusqu'au remblayage des LSF ; les étapes visent selon l'Andra au respect des conditions de réversibilité en équilibre avec une optimisation de la sûreté [56]. Le scénario prévisionnel de

fermeture proposé par l'Andra au stade du DDAC comprend l'obturation des alvéoles de stockage à la fin du remplissage de chaque quartier (notion de fermeture partielle par quartier). Ce scénario constitue selon l'Andra un optimum visant le respect des conditions de réversibilité en intégrant les enjeux de sûreté, industriels, de surveillance ainsi que l'acquisition de retour d'expérience sur les opérations de fermeture. Les étapes de fermeture consistent en un démontage des équipements d'exploitation, un remblayage des ouvrages souterrains et la mise en place de scellements (cf. chapitre 2.5.2 ci-dessous), selon les étapes principales suivantes [56] :

- obturation de l'alvéole, ce qui l'isole de sa galerie d'accès ;
- fermeture de la galerie d'accès à l'alvéole ;
- fermeture des galeries de liaison de la zone de stockage ;
- fermeture des zones de soutien logistique et des LSF.

Les ouvrages de scellement sont constitués de noyaux à base d'argile gonflante (cf. ci-dessous). Le remblaiement des galeries est prévu par réutilisation des déblais argileux excavés au moment du creusement et entreposés sur les « verses vives » en surface, additionnés le cas échéant de matériaux destinés à en ajuster les propriétés, faciliter la fabrication ou mise en place [56].

Des opérations préalables liées à la fermeture sont prévues par l'Andra dès le remplissage des alvéoles de stockage MA-VL et HA. Pour l'alvéole de stockage MA-VL, un mur de radioprotection composé d'un ensemble de blocs de radioprotection préfabriqués est mis en place par couche au fur et à mesure du remplissage des couches de colis dans l'alvéole. Une fois l'alvéole de stockage MA-VL rempli, les équipements d'alvéole MA-VL non nécessaires pour l'exploitation de l'alvéole et qui ne nécessitent pas de maintenance sont mis en veille (« sous cocon ») en attendant le début de la fermeture. Pour l'alvéole HA, dès la fin de son remplissage par des colis de déchets, un bouchon de fermeture, assurant également une fonction de radioprotection pendant l'exploitation, est inséré dans l'alvéole. En parallèle de la poursuite de l'exploitation de certaines parties du stockage, des installations de surface devenues inutiles pourront être démantelées ; c'est le cas en particulier pour le bâtiment nucléaire de surface EP1 à l'horizon 2100.

2.5.2. Fermeture des alvéoles HA, des quartiers pilote et de stockage HA

Les opérations de fermeture dans le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA sont identiques. Un bouchon de fermeture est mis en place dès la fin du remplissage d'un alvéole HA. Il consiste en quatre conteneurs métalliques remplis d'un matériau argileux, dont le gonflement va conduire à l'ouverture des conteneurs et à l'obturation de la tête d'alvéole. La bride d'exploitation est maintenue en place et les connexions des dispositifs de gestion de l'eau et de l'atmosphère sont obturées par simple fermeture des vannes. Une plaque d'identification et de protection est placée devant chaque tête d'alvéole, placée dès la fin de chargement de l'alvéole en vue d'une éventuelle opération de récupération des colis.

Les équipements dans la galerie d'accès présentant un important volume de vides ou en acier sont démantelés et acheminés vers la surface par la descenderie de service. Les radiers et les revêtements sont laissés en place. Les vides résiduels, la galerie d'accès HA et les recoupes sont remblayés intégralement par un matériau composé d'argilites issues des déblais de creusement (provenant des verses vives), additionné le cas échéant d'autres matériaux destinés à en ajuster les propriétés, faciliter sa fabrication ou sa mise en place.

La fermeture des galeries de liaison commence également par des opérations de démantèlement des équipements, de comblement des radiers et de remblayage, de façon similaire aux galeries d'accès. Six scellements de fond, décrits ci-après dans le chapitre 2.5.5, sont prévus (Figure 15).

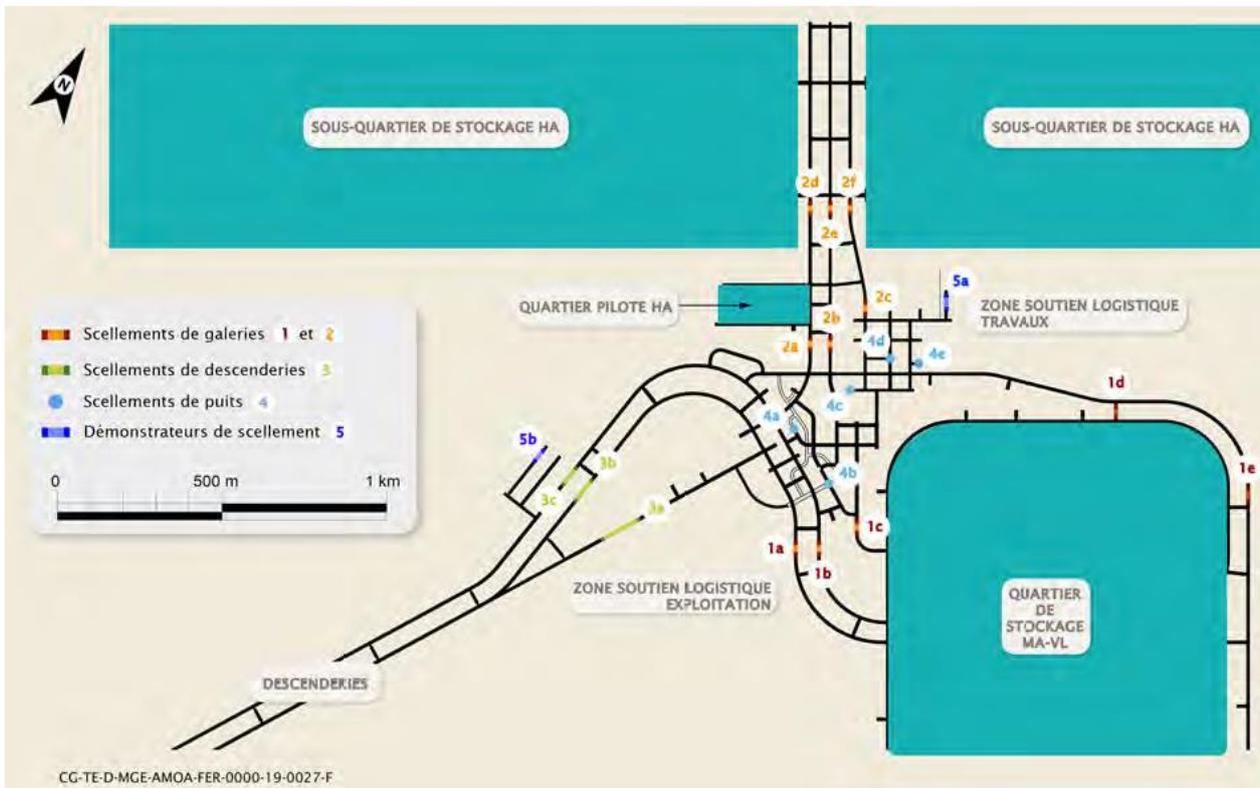


Figure 15. Localisation des scellements de fond pour le quartier MA-VL (1), pour les quartiers pilote et de stockage HA (2) et des démonstrateurs dans l'installation souterraine ; projection des scellements de descenderies (3) et de puits (4) [45].

2.5.3. Fermeture des alvéoles MA-VL et du quartier de stockage MA-VL

A la fin du remplissage d'un alvéole MA-VL, il est prévu que celui-ci reste sous ventilation nucléaire, qu'un mur de radioprotection soit mis en place et que les équipements soient placés sous cocon. La fermeture commence par un démantèlement des équipements de manutention des colis et d'exploitation dans la cellule de manutention de l'alvéole, l'arrêt de la ventilation nucléaire et la mise en place d'une ventilation secondaire. Le reste des équipements d'exploitation dans la cellule de manutention est enlevé puis la cellule de manutention, la galerie d'accès à l'alvéole et la jonction de retour d'air sont remblayées (cf. Figure 16 ci-dessus). Dans la partie utile de l'alvéole, la limitation des taux de vides est assurée par les colis (pas de remblayage).

La fermeture des galeries restantes (galeries de liaison, galeries de retour d'air, recoupes, et partie des galeries travaux restante située au nord du quartier) se fait par tronçons successifs et commence par des opérations de démantèlement des équipements, de comblement des radiers et de remblayage, de façon similaire aux galeries d'accès. Au stade du DDAC, les options de conception de référence ne prévoient pas la mise en place de scellement aux extrémités des alvéoles MA-VL, mais l'architecture en laisse la possibilité de choix aux générations futures [49]. Cinq scellements de fond du quartier MA-VL, décrits ci-après dans le chapitre 2.5.5, sont prévus.

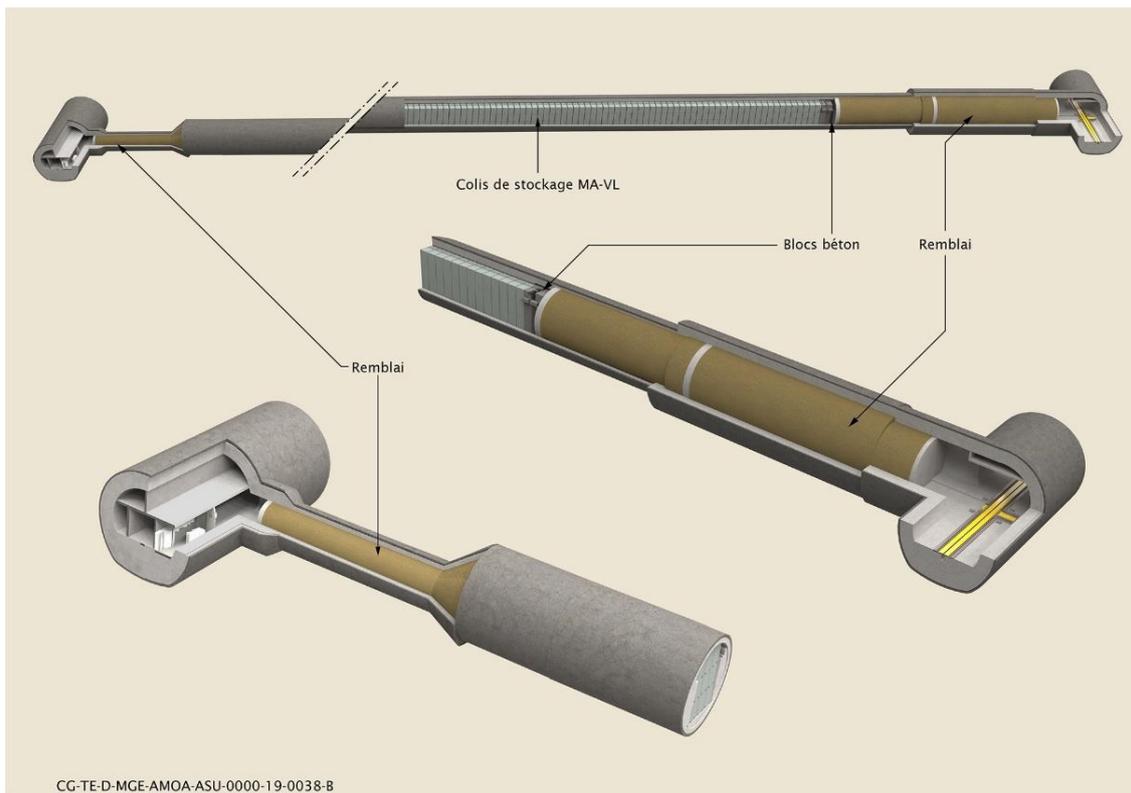


Figure 16. Illustration d'un alvéole MA-VL complètement fermé [50].

2.5.4. Fermeture des zones de soutien logistique exploitation et travaux

Lorsque toutes les galeries du quartier de stockage MA-VL et de la zone de stockage HA sont comblées et les différents scellements réalisés, les galeries des zones de soutien logistique exploitation et travaux sont intégralement remblayées, y compris les plénums de ventilation. Après démantèlement de certains équipements et comblement des radiers, le remblayage se fait avec un matériau similaire à celui utilisé pour la fermeture des quartiers de stockage.

2.5.5. Scellements de fond

L'Andra prévoit d'implanter des « scellements horizontaux » ou « scellements de fond » dans des galeries du niveau principal du stockage, c'est-à-dire dans l'unité argileuse (UA) du COX. Ils sont localisés (cf. Figure 15) de telle sorte que chaque quartier de stockage soit séparé de la surface par *a minima* deux scellements (un voire deux de scellements de fond, un scellement de liaison surface-fond). Les tronçons de galerie destinés à recevoir des scellements horizontaux sont orientés parallèlement à la contrainte horizontale majeure afin de limiter la zone endommagée induite par l'excavation [57].

Le concept de référence prévu par l'Andra pour les scellements de fond consiste à mettre en place un noyau à base d'argile gonflante (bentonite) sur une longueur de l'ordre de 20 m, après dépose du revêtement sur une partie de cette longueur. Afin de contraindre son gonflement et favoriser la mise en contact avec la roche, des massifs d'appui en béton ancrés dans la roche d'une longueur de l'ordre de 14 m sont placés de part et d'autre du noyau. La mise en œuvre des composants du scellement est permise par la réalisation de murs de soutènement (cf. Figure 17).

Afin de limiter les pressions de gaz attendues après fermeture du stockage, la conception des ouvrages de fermeture prévoit désormais qu'ils soient « passants au gaz » (évolution par rapport au DOS). Pour satisfaire à cette exigence, les noyaux de scellement sont composés d'un mélange de bentonite et d'additifs, tels que du sable [57].

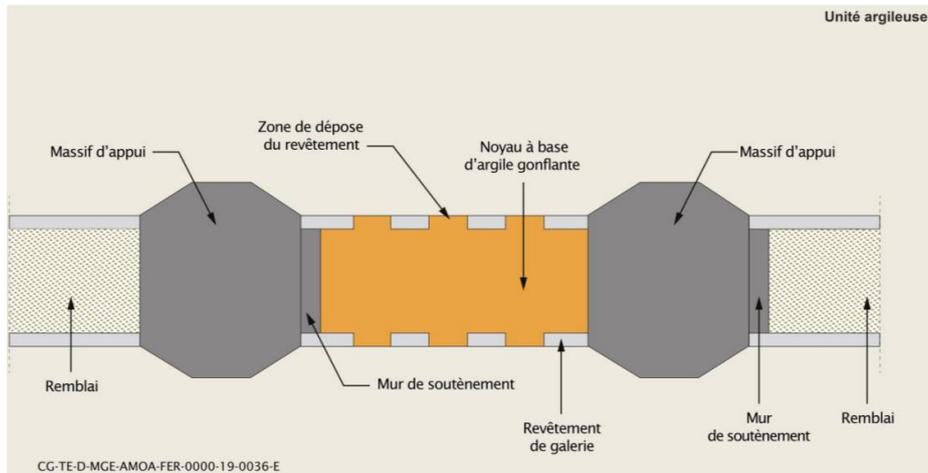


Figure 17. Schéma de principe de l'option de référence pour les scellements de fond [56].

Des variantes de ce concept de référence des scellements de fond sont à l'étude. Concernant le confinement du noyau, deux pistes sont étudiées (cf. Figure 18) :

- un confinement par frottement de massifs d'appui en béton non ancrés et du remblai ;
- un maintien du noyau par des murs de soutènement et un confinement par frottement du remblai.

Afin de prendre en compte la possibilité d'une dégradation de la zone endommagée au moment de la dépose des revêtements (qui ne permettrait plus garantir l'auto-colmatage (cf. chapitre 6.3.1), l'Andra étudie également une troisième variante (cf. Figure 18), consistant en des coupures hydrauliques radiales venant interrompre la continuité de la fracturation associée à cet endommagement. Les saignées (30 cm d'épaisseur) sont placées à intervalles d'ordre plurimétrique, remplies de matériau à base d'argile gonflante et d'une profondeur de l'ordre de plusieurs mètres.

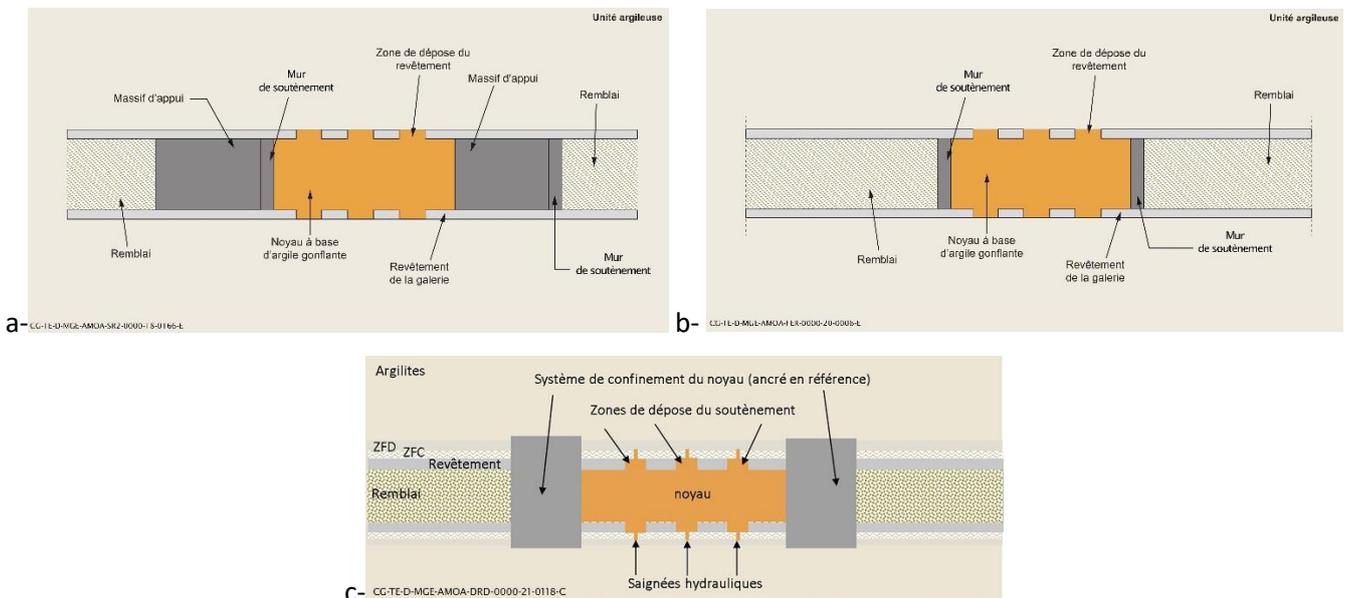


Figure 18. Schéma de principe des variantes de scellement de fond (a) avec confinement du noyau par frottement des massifs d'appui en béton non ancrés et du remblai, (b) avec confinement du noyau par frottement du remblai et (c) avec saignées pour la mise en place du noyau [58].

2.5.6. Fermeture et scellements des liaisons surface-fond

L'Andra prévoit que les LSF soient intégralement remblayées avec une compacité maximale afin de minimiser les vides. Au cours de ce remblayage, dans la partie supérieure du COX, les descenderies et les puits sont chacun fermés par un scellement à base d'argile gonflante. Ainsi qu'illustré en Figure 19, le scellement est mis en place au droit de la zone disponible de l'unité géologique la plus carbonatée, USC et de l'UT sous-jacente (cf. chapitre 2.1.3) [57].

Pour assurer un contact direct entre l'argile gonflante du noyau et les argilites, les revêtements des puits et des descenderies sont déposés au moment de la mise en place du noyau de scellement. La longueur du noyau d'argile est de 23 à 40 m selon les puits et d'environ 60 ou 100 m selon les descenderies [42][43].

Le confinement mécanique du noyau gonflant, assuré par des massifs d'appui en béton, permet de garantir la pérennité des performances hydrauliques et de stabilité hydromécanique du noyau. En puits, ces massifs de béton sont coulés sur toute la hauteur sous-jacente du noyau d'argile gonflante et, sur la partie supérieure, ils sont frottants et maintenus en place gravitairement par la pression du remblai sus-jacent. En descenderie, ils sont ancrés dans les argilites.

Des ouvrages de fermeture de séparation des formations aquifères de l'Oxfordien calcaire et du Tithonien sont prévus en partie supérieure du Kimméridgien, conformément au Code de l'environnement. Enfin, le trou de forage permettant le passage de la colonne à carburant est mis à nu et scellé à l'aide de bentonite à partir de la surface.

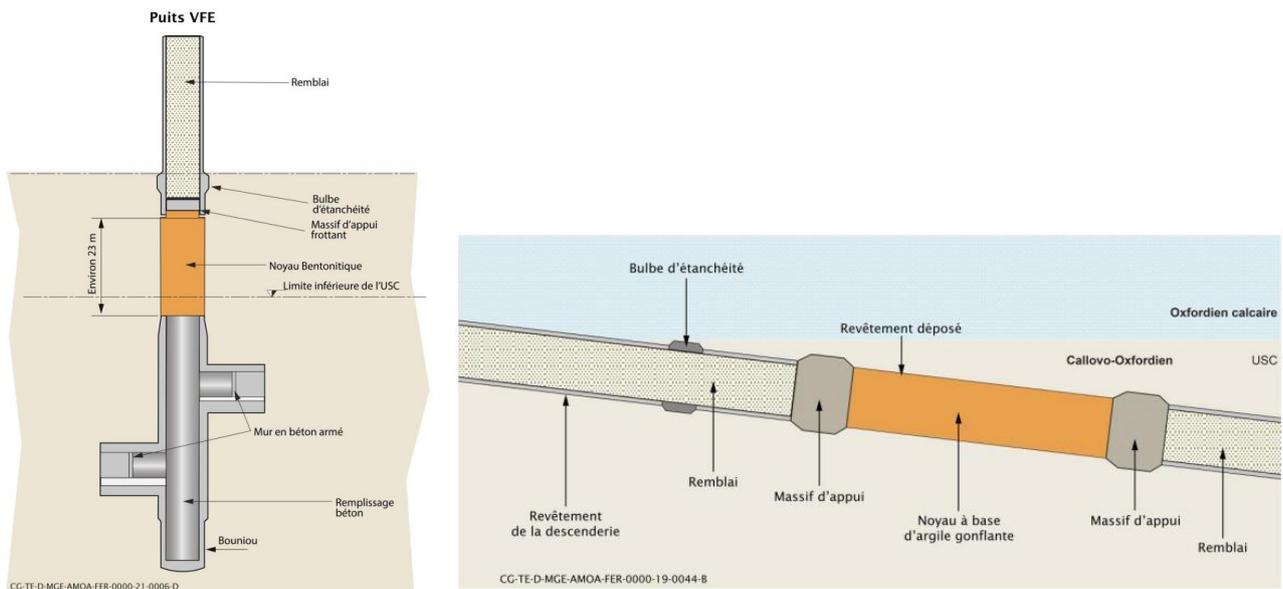


Figure 19. Schémas de principe des scellements de puits et de descenderies [56].

2.6. Adaptabilité de Cigéo à l'inventaire de réserve

Conformément à l'article D. 542-91 du code de l'environnement, l'Andra présente dans le DDAC, en plus de l'inventaire de référence, un inventaire de réserve sur la base duquel sont réalisées les études d'adaptabilité⁴ de Cigéo. Ainsi, comme indiqué au chapitre 2.3, l'Andra utilise les scénarios industriels prospectifs SR1 (allongement de la durée de fonctionnement du parc) et SNR enveloppe⁵ (arrêt de la production électronucléaire) pour établir

⁴ D'après l'Andra, « l'adaptabilité consiste à couvrir les incertitudes sur les inventaires en nombre et typologies de colis liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique par la vérification de la faisabilité du stockage des colis de l'inventaire de réserve et par l'identification d'évolutions dans sa conception et/ou de dispositions conservatoires à mettre en place dès sa construction initiale ».

⁵ Identique au scénario SNR, mais considérant un arrêt du parc actuel au bout de 50 à 60 ans, contre 40 ans pour le scénario SNR de l'IN de 2018.

l'inventaire de réserve de Cigéo présentés dans le DDAC [51][59]. Ces scénarios conduisent respectivement à une augmentation du nombre de colis de déchets HA et MA-VL et au stockage de combustibles usés. L'inventaire de réserve comprend également des déchets de faible activité à vie longue (**FA-VL**), au titre des incertitudes liées à la mise en place de filières de gestion de ces déchets.

De plus, à la demande de la **DGEC**, l'Andra a réalisé une étude de l'impact sur les filières de gestion, dont Cigéo, des déchets radioactifs générés par le déploiement de six réacteurs EPR2, mis en service par paires tous les quatre ans entre 2035 et 2044 pour une durée de 60 ans (projet **NNF**) [61]. L'Andra a également étudié l'impact sur Cigéo des déchets générés par l'allongement de la durée de fonctionnement de l'ensemble du parc actuel à 60 ans [64]. Ces éléments sont présentés au chapitre 3.1 du présent rapport.

Dans le cadre des études d'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve tel que présenté dans le DDAC [62], l'Andra conserve les grands principes d'architecture de Cigéo, en particulier concernant le stockage sur un seul niveau à environ 500 m de profondeur dans le COX, des quartiers de stockage distincts et à terminaison « borgne », le regroupement de la base des LSF, les scellements « passants aux gaz ». Le concept d'alvéole de stockage de colis FA-VL est similaire à celui des MA-VL et le concept d'alvéole de stockage des CU est similaire à celui des HA (conteneurs de stockage, façade d'accostage et chemisage, etc.). Les principes de dimensionnement du quartier de stockage des colis HA (alvéoles horizontales et borgnes, exigences thermiques, entraxes selon les critères THM) de l'inventaire de référence sont également retenus.

Concernant la conception, l'Andra mentionne les points principaux suivants [62] :

- la durée de fonctionnement de chacun des bâtiments nucléaires EP1, ET-H et EP2 devrait être prolongée de dix ans pour accueillir les colis MA-VL et HA supplémentaires (SR1), et celle de EP1 et ET-H de 15 ans pour accueillir les colis FA-VL ;
- une adaptation de la conception de la tête de la descenderie (mur fusible) serait nécessaire pour accueillir les colis de CU (SNR enveloppe) notamment en raison de leur longueur. En outre, afin de ne pas modifier les dimensions des ouvrages réalisés lors de la construction initiale (i.e. LSF et ZSLE), des adaptations des équipements seraient nécessaires pour permettre le changement d'orientation de la hotte de transfert des CU dans les galeries de liaison, et le diamètre de la galerie d'accès devrait être augmenté à la taille de celui des galeries de liaison ;
- l'accueil des colis HA supplémentaires (SR1) augmenterait l'emprise et prolongerait la durée de fonctionnement de l'installation souterraine de 10 ans, celui des MA-VL supplémentaires (SR1) se ferait dans les alvéoles existants sans prolonger la durée de fonctionnement de façon notable, celui des colis FA-VL conduirait à l'ajout d'un quartier de stockage FA-VL d'environ 14 alvéoles en interface avec la boucle du quartier de stockage MA-VL et à une prolongation de la durée de fonctionnement de la zone de stockage MA-VL d'environ 18 ans et enfin, l'accueil de colis de CU (SNR enveloppe) conduirait à l'ajout d'un quartier dédié et à une prolongation de la durée de fonctionnement de la zone de stockage HA (non précisée par l'Andra).

Concernant l'extension du quartier de stockage HA, l'Andra précise qu'elle peut être réalisée par exemple par une extension des quatre sous-quartiers existants vers l'est et l'ouest, et/ou par l'ajout de sous-quartiers supplémentaires au nord. La Figure 20 ci-dessous illustre une architecture possible dans cette combinaison SNR enveloppe considérant la prise en charge de colis FA-VL, avec environ 3 000 alvéoles de stockage des CU et un peu plus de 500 alvéoles de stockage des déchets HA.

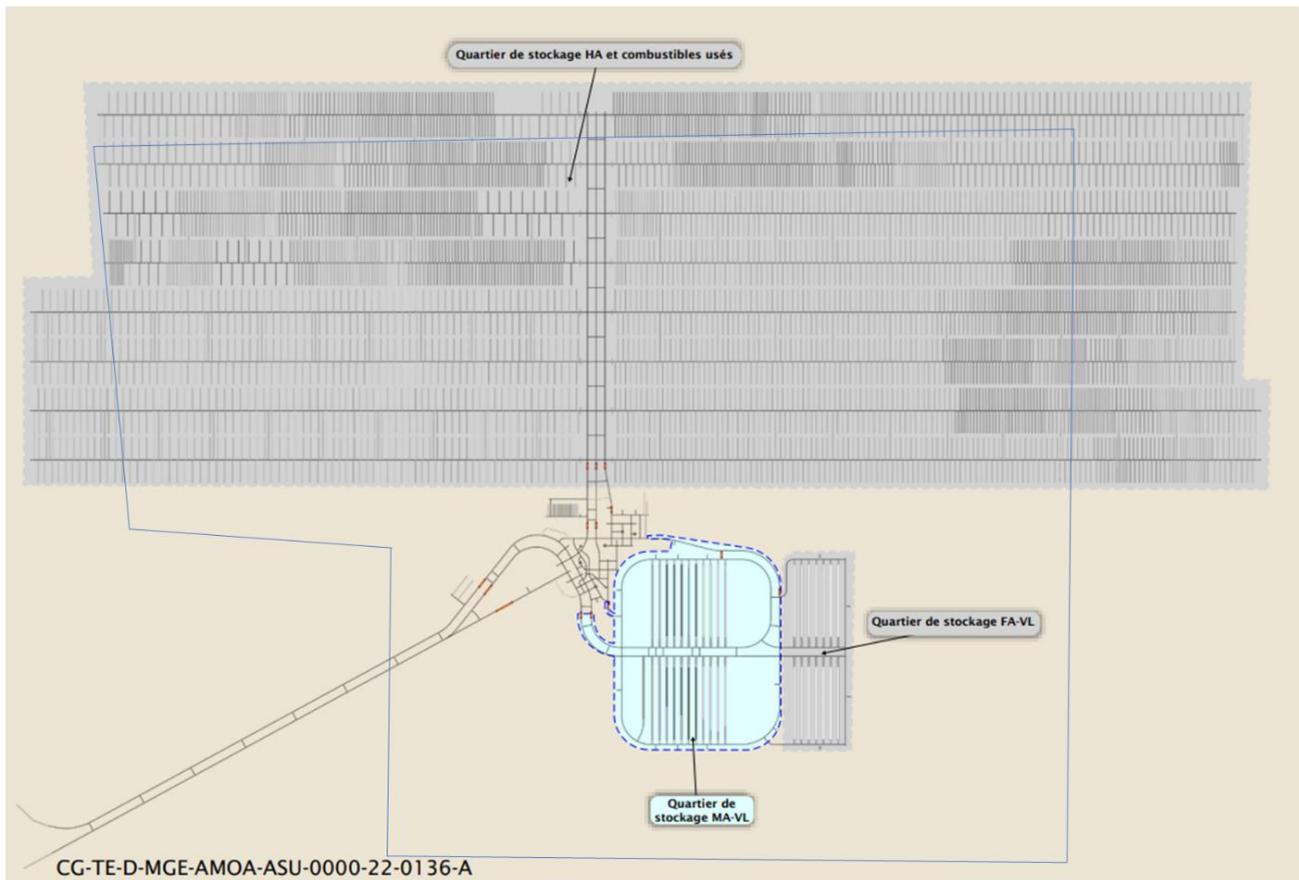


Figure 20. Exemple d'architecture de l'installation souterraine retenue pour les évaluations de sûreté après-fermeture dans le cas du stockage de l'inventaire de réserve associé au SNR enveloppe et des déchets FA-VL (transmis au cours de l'instruction).

3. LES COLIS DE DECHETS

Les éléments présentés par l'Andra dans le DDAC relatifs à la conception de l'installation et aux études de sûreté visent à démontrer la sûreté du stockage des colis de déchets figurant à l'inventaire de référence. Les éventuelles évolutions de la politique énergétique sont prises en compte au sein d'un inventaire de réserve, qui donne lieu à des études d'adaptabilité ; une modification du décret d'autorisation de création de Cigéo, sur la base notamment d'une démonstration de sûreté, serait nécessaire dans le cas où il serait envisagé de stocker tout ou partie de l'inventaire de réserve. L'élaboration des inventaires de référence et de réserve, sur la base de scénarios industriels prospectifs, est analysée ci-après. Les connaissances relatives aux colis primaires constituant les inventaires de référence et de réserve sont ensuite examinées, puis les éléments relatifs aux chroniques de livraison de ces colis, la démarche d'élaboration des inventaires radiologiques et en substances toxiques chimiques utilisés pour l'étude d'impact de Cigéo et enfin les éléments relatifs aux modes de stockage des colis primaires et aux spécifications préliminaires d'acceptation de ces colis dans Cigéo.

L'analyse de l'IRSN présentée ci-après s'intéresse principalement à la démarche mise en œuvre par l'Andra pour exploiter les données qui lui sont transmises par les producteurs de déchets, ainsi qu'à la cohérence des éléments présentés par l'Andra dans le DDAC avec ceux dont l'IRSN dispose (précédentes instructions, inventaire national, programmation pluriannuelle de l'énergie, etc.). Elle ne porte pas sur les données détaillées relatives aux caractéristiques des colis (criticité, thermique, etc.) ; certaines d'entre elles sont examinées dans le cadre des GP2 et GP3 de manière concomitante à l'analyse de la démonstration de sûreté de l'installation.



3.1. Scénarios industriels prospectifs

L'élaboration des inventaires de référence et de réserve de Cigéo s'appuie sur des éléments de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et de stratégies industrielles (fonctionnement des installations, démantèlement, etc.) qui sont déclinés dans des scénarios prospectifs, synthétisés dans l'Annexe T4. Comme indiqué *supra* (chapitre 2.3 notamment), les scénarios retenus par l'Andra au stade du DDAC de Cigéo sont issus des quatre scénarios industriels prospectifs (SR1, SR2, SR3 et SNR) de l'édition 2018 de l'IN, qui présente les quantités de déchets radioactifs au 31 décembre 2016 ainsi que les estimations de production de déchets à diverses échéances selon ces scénarios prospectifs [51][59].

Pour établir l'inventaire de référence [51][59], l'Andra retient le scénario SR2, qui postule une durée de fonctionnement du parc actuel⁶ de 50 ans ainsi qu'un multi-recyclage⁷ de tous les combustibles usés issus de ce parc et vise ainsi à maximiser le nombre de colis de déchets HA. Ce scénario présuppose la mise en service de filières pour l'utilisation du plutonium et de l'uranium issus du recyclage puis du multi-recyclage des combustibles usés (réacteurs EPR puis réacteurs RNR), ainsi que la disponibilité des usines de traitement du combustible et l'adaptation de leur durée de fonctionnement à celle du parc. L'inventaire de référence n'intègre toutefois pas les déchets du futur parc d'EPR puis de RNR. Indépendamment des choix de politique énergétique, ce scénario suppose que tous les combustibles usés issus d'activités de recherche et de défense sont traités.

L'Andra utilise deux scénarios industriels prospectifs pour établir l'inventaire de réserve de Cigéo [51][59]. D'une part, l'Andra retient le scénario SR1 pour considérer un allongement de la durée de fonctionnement à 60 ans d'une partie du parc actuel. Les autres hypothèses associées à ce scénario sont les mêmes que celles associées au scénario SR2, ce qui maximise le nombre de colis de déchets HA. D'autre part, afin de considérer un possible arrêt de la production électronucléaire, l'Andra retient le scénario « SNR enveloppe », destiné à maximiser le nombre de combustibles usés à stocker. Celui-ci postule un arrêt du parc actuel au bout de 50 ans à 60 ans selon les réacteurs (contre 40 ans dans le scénario SNR de l'édition 2018 de l'IN) et un arrêt anticipé du traitement des combustibles usés. Cette hypothèse sur la durée de fonctionnement conduit ainsi l'Andra à intégrer une quantité plus importante de combustibles usés à l'inventaire de réserve. Indépendamment des choix de politique

⁶ Le parc actuel intègre les réacteurs d'EDF en fonctionnement ainsi que l'EPR de Flamanville.

⁷ Le multi-recyclage correspond au traitement de tous les types de combustibles usés.

énergétique, le scénario SNR enveloppe suppose que les combustibles usés issus des activités de recherche et de défense ne sont pas traités.

Comme indiqué au chapitre 2.6 du présent rapport, l'Andra a réalisé en 2021 une étude de l'impact sur les filières de gestion des déchets radioactifs du déploiement de six réacteurs EPR2 (projet NNF), qui seraient mis en service par paires tous les quatre ans entre 2035 et 2044, pour 60 ans [61]. Au cours de l'instruction, l'Andra a également présenté des éléments relatifs à un allongement à 60 ans de la durée de fonctionnement de tous les réacteurs du parc actuel. L'Andra retient dans cette étude trois stratégies de traitement des combustibles usés : le multi-recyclage, le mono-recyclage (traitement des combustibles usés **UNE** uniquement) et l'arrêt du recyclage. Les inventaires de référence et de réserve sur lesquels est construit le DDAC n'intègrent pas les résultats de cette étude à ce stade. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que le projet NNF et l'allongement de la durée de fonctionnement de l'ensemble du parc actuel à 60 ans seraient portés à l'inventaire de réserve dans la mise à jour du DDAC en amont de l'enquête publique.

L'examen par l'IRSN de la démarche d'élaboration des inventaires de référence et de réserve porte sur la cohérence de cette démarche avec la PPE et l'inventaire national, ainsi que sur la prise en compte des incertitudes dans l'élaboration des inventaires.

L'IRSN rappelle que la PPE 2019-2028 actuellement en vigueur, adoptée par le gouvernement en avril 2020, prévoit notamment la poursuite du traitement des combustibles usés UNE, accompagnée d'études sur la faisabilité du multi-recyclage en REP⁸ à l'horizon 2040. L'IRSN considère que les scénarios retenus par l'Andra dans le DDAC, qui comprennent à la fois la poursuite de l'exploitation du parc actuel, le possible allongement de sa durée de fonctionnement, plusieurs stratégies de recyclage, et l'arrêt de la production électronucléaire sont cohérents avec la PPE actuelle et que, **en termes de volume et de nature de déchets, ces scénarios permettent de couvrir les possibilités envisagées dans l'édition de la PPE en vigueur fin 2023.**

L'IRSN constate toutefois que, dans l'édition 2023 de l'IN, parue après le dépôt du DDAC de Cigéo⁹, l'Andra présente quatre scénarios prospectifs, qui ont évolué par rapport aux scénarios de l'édition 2018 de l'IN sur lesquels est basé le DDAC (voir Annexe T4). En particulier, le seul scénario de poursuite de la production électronucléaire avec multi-recyclage est le scénario S1 (identique au SR1 de l'édition 2018). Ces évolutions ont, selon l'Andra, un impact négligeable sur le nombre de colis primaires MA-VL, mais conduisent à une augmentation de 17 % du nombre de colis primaires HA (cf. chapitre 3.3.2). Cette augmentation étant couverte par l'inventaire de réserve et les études d'adaptabilité associées présentées dans le DDAC, il appartiendra à l'Andra de poursuivre la bonne articulation des inventaires considérés pour Cigéo avec les éditions successives de l'IN.

Par ailleurs, l'IRSN souligne que certaines évolutions prévisibles de la PPE pourraient nécessiter d'actualiser les scénarios retenus. En effet, une mise à jour de la PPE est attendue dans les 12 mois suivants la révision¹⁰ de la Loi de programmation sur l'énergie et le climat, notamment pour prendre en compte la nouvelle trajectoire du nucléaire français. A cet égard, l'Andra a précisé, au cours de l'instruction, ne pas avoir encore réalisé d'études sur l'intégration des déchets de huit EPR2 supplémentaires éventuels pour atteindre le total de 14 nouveaux réacteurs EPR2 mentionnés dans la loi du 22 juin 2023 (loi dite « accélération du nucléaire »). L'IRSN relève en outre qu'aucun scénario ne suppose la mise en place de réacteurs de type SMR ou AMR. Ces éléments mettent en évidence la difficulté pour l'Andra de figer l'inventaire de réserve compte tenu de l'instabilité des scénarios industriels prospectifs. Dans ce contexte, **l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre, après l'obtention de l'autorisation de création de Cigéo le cas échéant, la prise en compte des évolutions possibles des scénarios industriels prospectifs utilisés pour établir l'inventaire de réserve, afin d'évaluer l'adaptabilité de l'installation à ces évolutions, sur la base d'études de sûreté associées.**

⁸ Le multi-recyclage en REP vise à traiter les combustibles usés de type MOX et à utiliser les matières résultantes dans un parc d'EPR2.

⁹ L'édition 2023 de l'IN a été publiée par l'Andra le 12/12/2023.

¹⁰ Cette révision était attendue pour juillet 2023, et n'est pas parue fin mars 2024.

En outre, l'IRSN note que le scénario SNR enveloppe présenté dans le DDAC conduit l'Andra à intégrer dans l'inventaire de réserve des combustibles usés, mais que d'autres déchets tels que du plutonium séparé ou des rebuts de MOX¹¹ n'y sont pas portés. Or l'édition 2018 de l'IN intègre, pour le scénario SNR d'arrêt de la filière électronucléaire, 290 tML¹² de rebuts de combustibles MOX non irradiés et 2 tML de plutonium non irradié séparé (respectivement 386 tML et 2 tML¹³ dans l'édition 2023 pour S4). L'Andra justifie l'absence de plutonium dans l'inventaire de réserve par la prise en compte d'un arrêt anticipé des opérations de traitement à La Hague, dans le cadre du scénario SNR enveloppe, entraînant un arrêt du traitement des combustibles UNE afin de ne pas détenir de plutonium séparé. L'IRSN estime que cette justification, d'une part ne permet pas d'expliquer l'absence dans l'inventaire de réserve du plutonium séparé recensé dans l'inventaire national (2 tML), d'autre part apparaît peu robuste eu égard aux multiples facteurs susceptibles d'impacter le cycle du combustible, telles que des difficultés de production de l'usine Melox d'Orano. A titre d'ordre de grandeur, d'après les chiffres donnés dans l'édition 2023 de l'IN, les prévisions de quantités de plutonium présentes sur le territoire français passent de 65 tML en 2021 à 43 tML en 2040. Dans l'hypothèse d'un non-renouvellement du parc actuel et d'un arrêt du traitement des combustibles usés en 2040 (scénario SNR ou S4), il faudrait, pour passer de 43 tML en 2040 à 2 tML (inventaire prévu à terminaison du scénario d'arrêt du nucléaire), consommer 41 tML de plutonium entre 2040 et l'arrêt des derniers réacteurs du parc actuel. L'IRSN souligne que cette hypothèse n'est pas compatible avec la durée de fonctionnement du parc actuel (50 ans, soit environ jusqu'en 2050 pour les derniers réacteurs). **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, avant l'enquête publique, à défaut de justification probante des hypothèses la conduisant à n'intégrer ni plutonium séparé ni rebuts de MOX dans l'inventaire de réserve, un programme d'études d'adaptabilité en vue de montrer la faisabilité de leur stockage.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E1](#) de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Par ailleurs, l'IRSN rappelle que la faisabilité technique du traitement des combustibles usés MOX a été démontrée sur la base de quatre campagnes entre 2004 et 2008. Toutefois, la mise en œuvre du traitement des combustibles usés MOX, en mélange avec des combustibles usés UOX, dans les usines actuelles de La Hague a généré des contraintes d'exploitation importantes, accompagnées de la nécessité de diluer les solutions de produits de fission obtenues avant leur vitrification [63]. De plus, les combustibles traités lors de ces campagnes présentaient des caractéristiques différentes, en particulier en termes de niveau d'irradiation, de celles attendues pour les combustibles usés MOX actuellement entreposés et futurs. Aussi, l'IRSN rappelle que le traitement des combustibles usés MOX à l'échelle industrielle nécessite encore des développements et souligne l'enjeu associé au traitement de ces combustibles en mélange avec des combustibles usés UOX, qui représentent la majorité des déchets vitrifiés de l'inventaire de référence (cf. chapitre 3.2 ci-après). A cet égard, l'IRSN constate que le scénario SNR enveloppe, qui postule un arrêt anticipé du traitement des combustibles usés, permet une gestion, par l'intermédiaire de l'inventaire de réserve, de l'incertitude associée au traitement des combustibles usés MOX. Cela renvoie au caractère adaptable de Cigéo, examiné au chapitre 9 du présent rapport ainsi que dans le cadre des GP2 et GP3.

S'agissant du traitement des combustibles usés particuliers, appartenant principalement au CEA, l'IRSN rappelle que l'ASN avait demandé au CEA, suite à l'instruction de sa stratégie de gestion des déchets, de réévaluer la stratégie de gestion de ses combustibles usés lorsque les études de faisabilité technico-économiques de leur traitement à l'usine Orano La Hague seraient achevées et de les qualifier, dans le cadre du PNGDMR 2022-2026, soit de « matière » soit de « déchet » lorsque la faisabilité technico-économique de leur traitement n'est pas acquise [64]. En l'absence de justification de la faisabilité technico-économique du traitement des combustibles usés, l'IRSN estimait, dans son expertise de la stratégie de gestion des déchets du CEA, que le CEA devrait les déclarer dans l'inventaire de référence de Cigéo [65]. Au cours de l'instruction, l'Andra a rappelé que la stratégie

¹¹ Rebuts de combustibles MOX, produits par l'usine Melox d'Orano, considérés à ce jour comme des matières mais qui ne sont pas traités dans le circuit actuel de l'usine d'Orano La Hague, et qui pourraient à terminaison être requalifiés en déchet.

¹² L'unité utilisée dans l'inventaire national pour présenter les quantités de matières radioactives est la tonne de métal lourd (tML), unité représentative de la quantité d'uranium, de plutonium ou de thorium contenue dans les matières.

¹³ Dans l'édition 2023 de l'IN, l'Andra précise que le plutonium requalifié en déchet provient du secteur de la recherche.

actuellement retenue par le CEA consiste à traiter l'ensemble de ses combustibles usés. En effet, le CEA a précisé dans le cadre de la réponse à l'action MAT.1 du PNGMDR 2022-2026 que les combustibles de type aluminure ou siliciure provenant des réacteurs de test et de recherche étaient valorisés dans l'usine UP3 de La Hague. Pour le reste de ses combustibles usés, le CEA maintient comme stratégie leur traitement dans les installations de La Hague suite notamment aux travaux menés entre 2013 et 2019 dans le cadre des études de faisabilité d'un projet de réalisation de nouveaux ateliers à La Hague adaptés au traitement des combustibles particuliers (TCP). L'IRSN rappelle toutefois que le projet TCP a été abandonné en 2022 et que les décisions structurantes concernant le renouvellement des ateliers qui pourraient permettre le traitement des combustibles particuliers restent à prendre. Aussi, l'IRSN estime qu'à ce jour, le CEA n'a pas apporté la garantie que l'ensemble de ses combustibles usés pourront faire l'objet d'un traitement. **En tout état de cause, eu égard aux incertitudes relatives au traitement des combustibles usés du CEA, l'IRSN estime nécessaire que les études d'adaptabilité de Cigéo permettent de s'assurer avec un niveau de confiance suffisant de la faisabilité du stockage de ces combustibles.** Ce point est examiné dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo.

Enfin, l'IRSN relève que les scénarios retenus par l'Andra ne tiennent pas compte d'éléments temporels tels que l'impact sur Cigéo de l'indisponibilité d'une installation du cycle du combustible (traitement des combustibles usés, conditionnement de déchets, etc.), qui pourrait conduire à la production plus tardive que prévue de colis de déchets à destination de Cigéo (voir action POL.3 du PNGMDR 2022-2026), ou encore l'impact d'une mise à disposition tardive des parcs EPR2 ou RNR, destinés à consommer les matières issues du traitement des combustibles du parc actuel (incluant les MOX). En effet, l'Andra suppose un traitement des combustibles usés au fur et à mesure du besoin d'alimentation du parc de réacteurs [59]. Or, l'IRSN estime qu'une mise à disposition plus tardive que prévue d'un futur parc, par exemple, décalerait le traitement des combustibles usés MOX, et par conséquent le stockage des déchets HA résultant de ce traitement. Aussi, **l'IRSN considère que l'Andra pourrait tenir compte d'incertitudes liées à des aléas industriels (indisponibilité de certaines installations de traitement des combustibles ou de conditionnement de déchets, disponibilité différée d'un futur parc, etc.) dans les chroniques de livraison associées aux scénarios qu'elle utilise, en particulier dans l'estimation de l'année de réception des derniers colis.** Ce point est repris au chapitre 3.4.



3.2. Inventaire de référence

3.2.1. Introduction

L'inventaire de référence (voir Annexe T5) intègre les déchets d'exploitation, déjà produits et à produire suivant le scénario SR2, ainsi que les déchets de démantèlement de toutes les installations nucléaires existantes, dont les réacteurs de production d'électricité, les usines du cycle du combustible d'Orano et les installations du CEA [51]. Les installations ayant obtenu leur décret d'autorisation avant 2016 sont également prises en compte (réacteur expérimental Jules Horowitz, réacteur d'essais RES et installation ITER). Sur cette base, l'inventaire de référence s'élève à environ 10 000 m³ de déchets HA (près de 56 000 colis primaires) et 73 000 m³ de déchets MA-VL (près de 167 000 colis primaires). L'IRSN relève que l'inventaire de référence a peu évolué depuis le DOS et estime qu'il est globalement conforme à la connaissance des volumes et des typologies de la plupart des colis de déchets déjà produits et de ceux à produire dans le cadre du scénario SR2.

Les colis primaires sont décrits dans l'inventaire de référence par familles élémentaires, qui constituent des subdivisions des familles de l'IN et permettent de présenter les caractéristiques des colis à une échelle adaptée pour mener les études sur Cigéo. L'inventaire de référence de Cigéo comprend 19 familles de colis HA et 80 familles de colis MA-VL. L'état de production de chaque famille entre dans l'une des quatre catégories suivantes définies par l'Andra :

- famille dont la production est terminée (catégorie « T ») ;
- famille en cours de production (« EC ») ;
- famille de colis non produits mais dont la définition du conditionnement est bien avancée (« F ») ;

- famille de colis non produits et dont le conditionnement est à déterminer (« AD »).

L'IRSN rappelle que, conformément à la décision de l'ASN n° 2017-DC-0587 du 23 mars 2017 [66] les producteurs de colis de déchets destinés à une installation de stockage en projet, telle que Cigéo, doivent obtenir de l'ASN un accord de conditionnement de ces colis préalablement à toute opération de conditionnement. Ainsi, toutes les familles de colis dont la production a débuté ou débutera après la date de prise d'effet de la décision précitée (1^{er} juillet 2018) font l'objet d'une demande d'accord par le producteur, sur la base d'un dossier intégrant un référentiel de conditionnement, dont l'instruction a notamment pour objectif de s'assurer de la compatibilité du colis avec l'ensemble des étapes de sa vie, en particulier son stockage à Cigéo. Pour les familles dont la production a débuté avant le 1^{er} juillet 2018, les autorisations de création de certaines installations, comme les usines de La Hague produisant les colis CSD-C et CSD-V, constituent des autorisations de conditionnement. En revanche, certains colis anciens n'ont pas fait l'objet de telles autorisations, ou n'ont pas été produits sous assurance qualité. Aussi, l'IRSN souligne que les niveaux de connaissances relatives aux familles de colis primaires (inventaire radiologique, procédé de conditionnement, conditions d'entreposage, etc.), liés au dépôt de référentiels de conditionnement (ou équivalent) par les producteurs, sont variables.

Par ailleurs, l'inventaire de référence présenté par l'Andra intègre, pour une partie des familles, des marges en nombre et en volume de colis primaires (voir Annexe T5) afin de couvrir les incertitudes sur le volume de déchets ou sur les modalités de conditionnement [67], utiles à l'Andra pour le dimensionnement de Cigéo. Ces marges sont définies par les producteurs de déchets et leur justification fait l'objet d'échanges entre l'Andra et les producteurs. L'IRSN relève que l'inventaire de référence intègre 15 familles HA et 55 familles MA-VL catégorisées « EC », « F », « AD » (familles dont la production est en cours ou non débutée), dont uniquement 3 familles HA et 20 familles MA-VL pour lesquelles l'Andra indique des marges. Certaines incertitudes sont déjà intégrées par les producteurs de déchets dans les chiffres présentés dans l'inventaire de référence (inventaire de déchets bruts pénalisant, paramètres de procédé enveloppes, etc.). Or l'IRSN estime que l'absence de discrimination de ces incertitudes, sous forme de marges, ne permet pas d'apprécier le conservatisme de l'inventaire de référence retenu par l'Andra pour le dimensionnement de Cigéo, étant donné les niveaux de connaissance variables associés à chaque famille. **Il appartiendra à l'Andra, dans la continuité de l'engagement 2017-E-03, de compléter les marges de manière lisible pour l'ensemble des familles de colis primaires de l'inventaire de référence, avant l'enquête publique.**

3.2.2. Colis primaires HA

Les 19 familles de colis primaires HA sont très majoritairement constituées de déchets vitrifiés issus du traitement des combustibles usés. L'IRSN relève ainsi que trois familles de déchets vitrifiés d'Orano (COG-140, COG-200 et COG-800) représentent 90 % du volume de colis primaires HA. Par ailleurs, fin 2021, 4 320 m³ de colis primaires HA étaient produits, et une seule famille de colis primaires HA entre dans la catégorie « AD » (CEA-1190, représentant moins de 0,05 % du volume de colis primaires HA).

Les déchets vitrifiés d'Orano (CSD-V) sont regroupés en différentes familles en fonction des types de combustibles traités (combustibles UOX seuls, mélanges UOX¹⁴/URE/MOX, combustibles du CEA, etc.) [51]. Les CSD-V issus du traitement des combustibles UOX sont déjà produits ou en cours de production. Les CSD-V issus du traitement futur des autres types de combustibles relèvent de la catégorie « F ». Les colis de verres Umo produits par Orano (CSD-U et CSD-RU), ainsi que des colis HA du CEA (déchet vitrifié de l'AVM, colis PIVER, colis Atalante) sont également intégrés à l'inventaire de référence. Enfin, l'inventaire de référence intègre quelques familles de colis de déchets HA non vitrifiés (colis CSD-S, déchets technologiques issus des ateliers de vitrification, sources). Sur la base des expertises qu'il produit régulièrement sur les colis HA (par exemple, avis IRSN [68][69][70][71]), **l'IRSN estime que les connaissances relatives aux colis primaires HA sont suffisantes au stade du DDAC pour permettre à l'Andra d'établir sa démonstration de sûreté.** L'IRSN rappelle toutefois l'enjeu, en

¹⁴ Formellement, les combustibles usés UOX sont des combustibles à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi (UNE) ou d'oxyde d'uranium de retraitement enrichi (URE). L'appellation UOX a été retenue dans ce chapitre pour désigner uniquement les combustibles UNE, en cohérence avec celle de l'inventaire de l'Andra.

termes de dimensionnement de Cigéo, associé au traitement des combustibles usés MOX en mélange avec des combustibles usés UOX (famille COG-200) (cf. chapitre 3.1), puisque les colis produits par leur traitement représentent plus de 40 % du volume de colis primaires HA à terminaison.

3.2.3. Colis primaires MA-VL

Les 80 familles élémentaires de colis MA-VL sont principalement constituées de déchets de structure issus du traitement des combustibles usés, de déchets résultant du traitement des effluents liquides ou de déchets technologiques issus de l'exploitation et du démantèlement d'installations. Fin 2021, 39 500 m³ de colis primaires MA-VL étaient produits et 24 familles¹⁵ de colis primaires MA-VL relèvent de la catégorie « AD ».

L'expertise de l'IRSN développée ci-après porte d'abord sur les colis primaires des familles des catégories « T », « EC » et « F », puis sur les colis primaires des familles de la catégorie « AD ».

Familles « T », « EC », « F »

Les colis produits, en cours de production, ou à produire selon un conditionnement dont la définition est bien avancée sont, par exemple, les colis CSD-C ou CEC de coques et embouts compactés ou cimentés, les colis de déchets bitumés, les colis C1PG^{SP} de déchets activés d'EDF, les colis CBF-C'2 de déchets d'exploitation d'Orano, et divers colis cimentés du CEA. **L'IRSN estime, sur la base des expertises qu'il produit régulièrement sur les colis MA-VL** (par exemple, avis IRSN [72][73][74][75]), **que les connaissances relatives aux colis des familles des catégories « T », « EC » et « F » sont globalement suffisantes au stade du DDAC pour permettre à l'Andra d'établir la démonstration de sûreté de Cigéo.** Deux points d'attention sont toutefois développés ci-après.

S'agissant des colis de déchets bitumés, produits par Orano et le CEA, l'IRSN rappelle que deux modes de stockage sont envisagés dans le DDAC : un stockage en l'état ou un stockage après traitement thermique visant à neutraliser leur réactivité chimique. Pour leur stockage en l'état, l'ASN a estimé, dans son avis n°2020-AV-369 [76], qu'il était « *nécessaire que les producteurs mettent en œuvre un programme ambitieux de caractérisation des colis de déchets bitumés, indispensable pour développer la démonstration que tout ou partie des colis de déchets bitumés pourrait être stocké avec un haut niveau de sûreté sans traitement préalable dans l'installation en projet Cigéo* ». Pour les colis dont la sûreté du stockage ne peut être démontrée, l'ASN estime que « *les études concernant leur éventuel traitement préalable doivent être poursuivies avec pour objectif de permettre leur stockage dans des conditions sûres* ». Plusieurs procédés thermiques ont ainsi été identifiés : incinération suivie d'une vitrification, combustion classique suivie d'une cimentation ou d'une vitrification, et vaporeformage [77]. Dans le cas où ce type de traitement était décidé, l'Andra indique que de nouvelles familles de colis devraient être intégrées à l'inventaire de référence à la place des familles de déchets bitumés. Si de tels déchets étaient intégrés à l'inventaire de référence, l'Andra retient à ce stade l'hypothèse de 25 000 colis vitrifiés, résultant d'une combustion suivie d'une vitrification, contre environ 40 000 colis de déchets bitumés intégrés à l'inventaire de référence. S'agissant du stockage en l'état des colis de déchets bitumés, pour lesquels des études complémentaires sont en cours dans le cadre du programme quadripartite Babylone, dont l'objectif principal vise à améliorer les connaissances relatives aux caractéristiques des colis de déchets bitumés et à leur réactivité chimique, l'accessibilité de la démonstration de sûreté de ce mode de gestion fait l'objet d'une analyse dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo. En effet, l'IRSN rappelle que les déchets bitumés présentent des enjeux spécifiques en lien avec leur réactivité et la maîtrise du risque incendie en exploitation. Par ailleurs, l'IRSN rappelle que, dans le cadre du PNGMDR, des travaux sont en cours sur la recatégorisation en déchets FA-VL d'une partie des colis de déchets bitumés actuellement catégorisés en MA-VL. Ces travaux pourraient conduire à des évolutions des inventaires de référence et de réserve (voir chapitre 3.3.1).

Par ailleurs, comme indiqué *supra*, certains colis primaires intégrés à l'inventaire de référence n'ont pas fait l'objet d'accord de conditionnement et n'ont pas été produits sous assurance qualité. Par exemple, les colis

¹⁵ Dans l'inventaire de référence transmis dans le DDAC [67], la famille COG-400 (colis PIVIC) relève de la catégorie « F », et seules 23 familles relevaient de la catégorie « AD ». Au cours de l'expertise, l'Andra a indiqué que cette famille relevait désormais de la catégorie « AD », suite à l'abandon du projet PIVIC.

500 L MI et 870 L FI, contenant des déchets solides d'exploitation, de maintenance, d'assainissement ou de démantèlement de différents centres du CEA, ont été produits dès les années 1970. Pendant plusieurs années, les premiers colis produits l'ont été sans disposition d'assurance de la qualité, et certains colis ont été entreposés dans des conditions dégradées (soumis aux intempéries et aux fluctuations de températures), qui sont susceptibles d'avoir altéré les performances mécaniques ou de confinement de leur enveloppe métallique et de leur matrice cimentaire. En outre, les connaissances associées aux colis produits sans dispositions d'assurance de la qualité (inventaire radiologique, nature précise des déchets, procédés de conditionnement, etc.) sont moins fiables que celles associées aux colis plus récents. Toutefois, l'IRSN souligne que des opérations de reprise de certains de ces colis, actuellement en cours et accompagnées de caractérisations, permettent de réduire progressivement les incertitudes quant aux connaissances précitées et à leur état après entreposage. Par ailleurs, l'IRSN souligne que les demandes d'accord de conditionnement *a posteriori* des colis 500 L MI et 870 L FI produits depuis 2012 ont fait l'objet d'un premier examen [78][79], au cours duquel l'IRSN a notamment estimé qu'il subsistait des incertitudes sur le maintien de leurs performances mécaniques et de confinement au cours d'un entreposage de plusieurs dizaines d'années. Des compléments apportés par le CEA font actuellement l'objet d'une instruction.

Plus généralement, s'agissant des colis anciens produits sans disposition d'assurance de la qualité et ayant pu être entreposés dans des conditions parfois dégradées, l'IRSN rappelle que les contrôles réalisés par l'Andra, dans les installations d'entreposage des producteurs ou à réception à Cigéo, constituent un moyen de vérifier que les spécifications d'acceptation sont bien respectées. **Aussi, l'IRSN souligne, pour les colis anciens, l'enjeu fort associé aux opérations de surveillance effectuées par l'Andra dans les installations d'entreposage, ainsi qu'à la vérification du respect des spécifications d'acceptation à Cigéo lors de leur désentreposage et/ou de leur réception à Cigéo.** Les spécifications préliminaires d'acceptation, ainsi que les contrôles à réception des colis primaires, font l'objet d'une analyse dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo. En tout état de cause, l'IRSN rappelle qu'en cas d'absence de démonstration du maintien du confinement statique des colis primaires pendant la phase d'exploitation de Cigéo, l'Andra pourrait recourir à une mise en conteneurs de stockage renforcés vis-à-vis du confinement (couvercle vissé et clavé).

Familles « AD »

Les 24 familles de la catégorie « AD », représentant 16 % de l'inventaire de référence en volume de colis primaires MA-VL, sont constituées, par exemple, des déchets irradiants d'exploitation et de démantèlement de diverses installations du CEA, des boues de STE2, des déchets contaminés en émetteurs alpha ou encore des déchets d'ITER [51]. Deux exemples de familles « AD » sont détaillés ci-après.

La famille COG-430, représentant à elle seule un tiers du volume des colis primaire MA-VL de la catégorie « AD », est constituée d'environ 9 000 m³ de boues provenant du traitement d'effluents dans STE2 et présentant un potentiel de réactions chimiques exothermiques important [51]. Plusieurs solutions de conditionnement de ces boues ont été successivement présentées par Orano (bitumage, déshydratation sur sécheur à couche mince et conditionnement en colis C5), mais aucune de ces solutions n'a jusqu'à présent été retenue. En particulier, le conditionnement en colis C5 a été abandonné par Orano en raison notamment de difficultés techniques liées à l'exploitation et à la maintenance des équipements de procédé. Orano a récemment indiqué que deux autres procédés de traitement des boues étaient en cours d'études (calcination et cimentation sans ajout d'eau) et qu'il n'exclut pas la possibilité de les bitumer. Bien que l'inventaire transmis au stade du DDAC indique que le conditionnement primaire est « à déterminer », l'IRSN relève que les nombres et les volumes de colis primaires sont identiques à ceux retenus au stade du DOS pour un conditionnement en colis C5 (14 429 colis primaires, représentant un volume total de 3 867 m³). A cet égard, l'IRSN estime que les caractéristiques du colis C5, après séchage puis compactage des boues, ne permettent pas de considérer que le volume et le nombre de colis primaires obtenus par ce mode de conditionnement sont enveloppes de ceux qui pourraient être obtenus avec d'autres procédés de conditionnement. A titre d'ordre de grandeur, l'IRSN considère que le recours possible à des procédés de conditionnement avec des taux d'incorporation des déchets relativement faibles, tels que la cimentation ou le bitumage, pourrait conduire à la production de plus de 40 000 colis primaires supplémentaires

par rapport à l'inventaire de référence, impactant notamment le nombre d'alvéoles MA-VL et les chroniques de stockage des colis. A titre de comparaison, l'Andra prévoit que les 42 000 fûts de déchets bitumés MA-VL de l'inventaire de référence actuel occupent huit alvéoles de stockage [76]. De plus, l'Andra prévoit en cadence industrielle de stocker 1 100 colis de stockage¹⁶ MA-VL par an. La mise en stockage de 40 000 colis supplémentaires, placés en conteneur de stockage rassemblant 4 colis primaires, nécessiterait une durée de fonctionnement de Cigéo de l'ordre de dix ans supplémentaires. **Aussi, eu égard notamment à l'incertitude significative sur le nombre de colis, l'IRSN estime que l'Andra devrait retenir, pour la famille COG-430, des marges permettant de couvrir les volumes qui pourraient être générés par d'autres modes de conditionnement que celui en colis C5.**

La famille COG-400 est constituée de déchets, notamment organiques, contaminés en émetteurs alpha. D'après l'inventaire de référence transmis au stade du DDAC [51], il est prévu que ces déchets soient conditionnés en colis PIVIC, représentant un volume total de 425 m³. Le projet PIVIC, associant l'incinération, la vitrification et la fusion, avait été proposé par Orano en application de la décision ASN n°2014-DC-0464. Toutefois, Orano a décidé en 2023 d'abandonner ce projet. Cette famille est ainsi passée de la catégorie « F » à la catégorie « AD » après le dépôt du DDAC. L'une des solutions alternatives actuellement identifiées par Orano est un conditionnement privilégiant un procédé de type densification et enrobage dans une matrice cimentaire. Quelque que soit le procédé de conditionnement finalement retenu, l'IRSN estime que l'abandon du procédé PIVIC et du traitement thermique associé, ainsi que l'incertitude sur le conditionnement futur des déchets concernés, auront un impact sur la quantité et la nature des colis primaires de la famille COG-400, et par conséquent sur le dimensionnement de Cigéo du point de vue du volume de stockage disponible, bien que dans une moindre mesure au regard du point développé *supra* relatif aux boues de STE2.

De manière générale, s'agissant des colis « AD », l'Andra a précisé au cours de l'instruction retenir dans l'inventaire de référence les hypothèses de conditionnement formulées par les producteurs de déchets (type de conditionnement primaire et volume associé). L'Andra considère que le cas d'une éventuelle augmentation significative du nombre de colis primaires ainsi que du volume associé est couvert par la flexibilité¹⁷ de l'installation. L'IRSN relève qu'à ce stade, l'Andra n'intègre dans l'inventaire de référence que les hypothèses prises par les producteurs, sans analyse complémentaire de leur caractère enveloppe. En outre, les exemples des familles COG-400 et COG-430 détaillés ci-avant montrent que les incertitudes sur les procédés de conditionnement ont une influence sur le nombre et le volume de colis primaires, et par conséquent sur le nombre d'alvéoles MA-VL, les chroniques de stockage des colis et les durées d'exploitation des alvéoles. Toutefois, l'IRSN convient de la difficulté de réaliser des études pour chaque mode de conditionnement envisagé par les producteurs.

En conclusion, l'IRSN considère que l'Andra devra, pour la mise à jour du DDAC prévue avant l'enquête publique, intégrer pour les familles de colis primaires de l'inventaire de référence dont le conditionnement reste à définir, des incertitudes sur les modes de conditionnement en termes de nombre et de volume de colis primaires MA-VL. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E2](#) de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant. Il appartiendra toutefois à l'Andra d'évaluer les conséquences de ces incertitudes sur le nombre d'alvéoles MA-VL ainsi que sur les durées de mise en stockage des familles de colis concernées. En tout état de cause, le caractère flexible de l'installation au regard de ces incertitudes constitue un point d'attention vis-à-vis de la sûreté en exploitation, dont l'examen fait l'objet du GP2.



3.3. Inventaire de réserve

Conformément à l'article D.542-91 du code de l'environnement, l'inventaire de réserve (voir Annexe T6) intègre les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion des déchets et à des évolutions

¹⁶ La terminologie « colis de stockage » décrit les colis tels que stockés dans les alvéoles de l'installation Cigéo, c'est-à-dire des colis primaires mis en conteneurs de stockage ou des colis primaires seuls, dans le cas du stockage direct (voir chapitre 3.6 [77]).

¹⁷ La flexibilité est définie par l'Andra notamment comme « la capacité à accepter certaines variations de l'inventaire de colis de déchets de référence » et « la capacité (...) à pouvoir recevoir des colis de déchets MA-VL dont le type de conditionnement et/ou le mode de stockage aurait évolué ».

de politique énergétique. Le présent chapitre porte principalement sur les volumes et la nature des déchets intégrés à l'inventaire de réserve sur la base de ces incertitudes. Les impacts du stockage des déchets de l'inventaire de réserve sur la sûreté de Cigéo (études d'adaptabilité) sont examinés par l'IRSN dans le cadre des GP2 et GP3 relatifs à la sûreté en phase d'exploitation et en phase d'après-fermeture (voir également le chapitre 9 du présent rapport).

3.3.1. Incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion

Les incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion concernent principalement les déchets FA-VL [80]. A ce titre, l'inventaire de réserve intègre 30 familles de déchets FA-VL :

- 20 familles de déchets de graphite issus de l'exploitation et du démantèlement des réacteurs UNGG, représentant 93 000 m³, soit près de 13 000 colis primaires ;
- 6 familles de déchets dits « UNGG de La Hague », issus du traitement de combustibles UNGG et entreposés à La Hague, représentant 4 000 m³, soit près de 3 000 colis primaires ;
- 1 famille de déchets bitumés, représentant 12 700 m³, soit un peu plus de 32 000 colis primaires ;
- 3 familles de déchets divers de « petits » producteurs, collectés par l'Andra, représentant 37 m³, soit 42 colis primaires.

L'IRSN estime que l'inventaire de réserve intègre bien l'ensemble des déchets FA-VL existants, à l'exception des déchets radifères. A cet égard, l'IRSN souligne que le PNGMDR 2022-2026 retient le stockage dans une (ou plusieurs) future installation dédiée aux déchets FA-VL comme l'option de référence pour la gestion de ces déchets. L'IRSN rappelle en outre, comme indiqué *supra*, que l'inventaire de réserve pourrait être amené à évoluer à l'issue des travaux en cours dans le cadre du PNGMDR relatifs à la recatégorisation de colis de déchets bitumés MA-VL en FA-VL.

S'agissant des déchets de graphite, l'Andra prévoit que les déchets d'EDF soient conditionnés en conteneur béton CS4-graphite de 10 m³ et ceux du CEA en conteneur CBFK-B de 5 m³ et précise que ces conditionnements sont susceptibles d'évoluer dans les prochaines années, en fonction notamment des résultats d'études sur les filières de gestion des déchets de graphite. Les déchets « UNGG La Hague » sont composés de déchets de structure et déchets de faible granulométrie [80]. Concernant les déchets de structure entreposés dans les silos 115 et 130 du site de La Hague, l'IRSN rappelle que des études sont en cours (i) sur un conditionnement intermédiaire des déchets du silo 130 dans l'attente de la définition d'un conditionnement définitif, (ii) pour démontrer la faisabilité de la cimentation des déchets du silo 115. Pour les déchets de faible granulométrie, Orano envisage une cimentation en colis CBF-C2K, dont la démonstration de la faisabilité est en cours. Les déchets bitumés FA-VL proviennent du traitement d'effluents liquides à la STEL de Marcoule, et présentent des activités radiologiques plus faibles que les colis de déchets bitumés MA-VL intégrés à l'inventaire de référence .

Les colis de déchets pris en compte dans l'inventaire de réserve au titre des incertitudes sur la mise en place de nouvelles filières de gestion des déchets n'appellent pas de remarque particulière de la part de l'IRSN. **Aussi, au stade du DDAC de Cigéo, l'IRSN estime que les connaissances sur les colis primaires de l'inventaire de réserve liés à la mise en place de nouvelles filières de gestion sont suffisantes pour les études d'adaptabilité.**

3.3.2. Incertitudes liées à des évolutions de politique énergétique

En préambule, l'IRSN rappelle que les incertitudes liées à des évolutions de politique énergétique traitées dans le cadre du présent examen ne concernent que les évolutions couvertes par les scénarios SR1 et SNR enveloppe et celles prévisibles à date de dépôt du DDAC. En outre, l'examen de l'IRSN porte sur la cohérence des volumes retenus dans le DDAC au regard de l'IN, ainsi que sur le caractère suffisant des connaissances sur lesquelles se fondent les études d'adaptabilité afin d'en apprécier la pertinence.

Scénario SR1

Le scénario SR1, qui diffère du scénario SR2 considéré pour établir l'inventaire de référence uniquement par la durée de fonctionnement du parc comprise entre 50 et 60 ans selon les réacteurs (contre 50 ans pour tous les réacteurs dans le scénario SR2), conduit à intégrer à l'inventaire de réserve les déchets HA et MA-VL issus du traitement des combustibles usés ainsi que les déchets de fonctionnement induits par un allongement de la durée de vie du parc. Ce scénario conduit à une augmentation de 17 % du nombre de colis HA et de 0,1 % du nombre de colis MA-VL par rapport à ceux intégrés à l'inventaire de référence [80]. Les colis concernés sont des CSD-V (près de 10 000 colis supplémentaires) et des C1PG^{SP} (120 colis supplémentaires). Les CSD-C et CBF-C'2 pourraient également être impactés, mais l'Andra estime que leurs quantités restent inchangées. En effet, pour ces colis, l'allongement de la durée de fonctionnement du parc est compensé par une réévaluation à la baisse du nombre de colis produits dans les années à venir. Au cours de l'expertise, l'Andra a précisé que cette réévaluation était basée sur un retour d'expérience de la production de ces colis dans l'usine de La Hague. Etant donné que les colis de déchets intégrés à l'inventaire de réserve dans le cas du scénario SR1 sont de même nature que ceux déjà présents dans l'inventaire de référence et que le niveau des connaissances relatives à ces colis est satisfaisant (cf. chapitre 3.2), **l'IRSN estime qu'à ce stade, ces éléments relatifs au scénario SR1 sont suffisants, en termes de volume et de typologie de déchets, pour mener les études d'adaptabilité.**

Scénario SNR enveloppe

S'agissant du scénario de non-renouvellement du parc, dit SNR enveloppe, l'Andra considère que l'ensemble des combustibles usés MOX et URE et une partie des combustibles usés UNE ne sont pas traités [80]. Ce scénario suppose également que les combustibles issus d'activités de recherche ou de défense ne sont pas traités. Le scénario SNR enveloppe conduit à stocker un nombre plus faible de colis HA (-34 %) et MA-VL (-15 %). En revanche, des combustibles usés sont requalifiés en déchets et sont stockés en l'état. L'inventaire de réserve intègre ainsi plus de 60 000 assemblages UNE, URE, MOX et RNR issus de l'exploitation des réacteurs d'EDF, répartis comme suit :

- 58 000 assemblages REP (39 000 UNE, 7 000 URE et 12 000 MOX), représentant près de 53 000 m³ une fois conditionnés ;
- un peu plus de 1 000 assemblages RNR représentant environ 500 m³ une fois conditionnés ;
- près de 2 700 assemblages EL4¹⁸, représentant environ 150 m³ une fois conditionnés.

Ces combustibles représentent 94 % de l'ensemble des combustibles à stocker. Les 6 % restants sont constitués de combustibles usés du CEA (dont environ 2 000 colis primaires qui représentent 290 m³ une fois conditionnés pour les combustibles du CEA issus d'activités de recherche).

S'agissant des combustibles usés du parc de réacteurs d'EDF [80], les combustibles UNE et URE sont respectivement à base d'oxyde d'uranium naturel ou de retraitement enrichi en ²³⁵U. Les combustibles MOX sont quant à eux à base d'oxydes mixtes uranium-plutonium. Ces trois types de combustibles sont constitués d'une gaine en alliage de zirconium. Certains combustibles usés RNR (dits « MOX-SPX »), de type oxyde mixte uranium-plutonium avec une gaine en acier inoxydable, proviennent de Superphénix. Ils sont répartis en plusieurs familles élémentaires, selon que les assemblages soient neufs ou irradiés et composés d'aiguilles fissiles ou fertiles. A ce stade, l'Andra prévoit que les combustibles UNE, URE, MOX et RNR MOX-SPX soient conditionnés en conteneurs métalliques. Enfin, les combustibles EL4, issus du réacteur à eau lourde de Brennilis, sont à base d'oxydes d'uranium faiblement enrichis avec une gaine en alliage de zirconium-cuivre. Ces combustibles sont conditionnés en conteneurs en acier inoxydable.

Les combustibles issus des réacteurs expérimentaux du CEA présentent des typologies variées [80] :

- les combustibles à base d'uranium métallique, utilisés dans des réacteurs de la filière UNGG et dans des réacteurs expérimentaux de la filière à eau lourde, sont conditionnés en étuis et regroupés dans des conteneurs en acier inoxydable ;

¹⁸ Combustibles du réacteur à eau lourde de Brennilis.

- les combustibles dits « caramel » du réacteur Osiris sont constitués de plaquettes d'oxydes d'uranium dans une gaine en zircaloy ;
- les combustibles du réacteur Phénix sont constitués de différents types d'aiguilles composées d'une gaine en acier inoxydable contenant des pastilles fissiles et/ou fertiles ;
- les combustibles des réacteurs de recherche Phébus et Cabri sont constitués d'oxydes d'uranium faiblement enrichis et assimilés à des combustibles de type REP UOX ;
- les combustibles dits « expérimentaux » (combustibles pour les réacteurs Rapsodie et Phénix, combustibles MOX issus de réacteurs RNR, combustibles entreposés à l'INB n°72, etc.) présentent diverses typologies (oxydes d'uranium ou oxydes mixtes, carbure, siliciure, etc.), différents enrichissements et taux de combustion et des formes géométriques variées (crayons, tronçons, fragments, etc.). Ils sont conditionnés en conteneurs en acier inoxydable ;
- les combustibles CEA de la propulsion nucléaire navale sont de type métallique constitués d'un alliage d'uranium et de zirconium et de type oxydes composés de dioxyde d'uranium. Les combustibles métalliques sont conditionnés dans des conteneurs métalliques et les combustibles oxydes sont entreposés en piscine.

L'IRSN estime que les données présentées par l'Andra, relatives au nombre et à la typologie des combustibles usés intégrés dans l'inventaire de réserve, sont complètes et cohérentes avec les éléments dont l'IRSN dispose. **Ainsi, au stade du DDAC de Cigéo, l'IRSN estime que les connaissances associées aux combustibles usés d'EDF et du CEA sont suffisantes pour les études d'adaptabilité. L'IRSN rappelle toutefois les incertitudes relatives au traitement des combustibles usés du CEA, présentant une typologie plus diverse que celles des combustibles usés d'EDF (cf. chapitre 3.1).**

Intégration des déchets du projet NNF et allongement à 60 ans

L'IRSN rappelle que les déchets issus du projet NNF (mise en service de six EPR2) et de l'allongement à 60 ans de la durée de fonctionnement de tous les réacteurs du parc actuel ne sont pas intégrés à l'inventaire de réserve transmis dans le DDAC, mais qu'ils y seront intégrés pour la mise à jour du DDAC avant l'enquête publique.

Dans son rapport relatif au projet NNF [61], l'Andra précise que les déchets MA-VL générés par six EPR2 sont de caractéristiques géométriques, physico-chimiques, radiologiques et thermiques identiques à celles des déchets MA-VL générés par le parc actuel. Les volumes évalués par l'Andra (Annexe T7) représentent environ 5 % du volume de déchets MA-VL intégrés à l'inventaire de référence. S'agissant des déchets HA, l'Andra estime que les déchets produits dans le cadre du projet NNF ont les mêmes caractéristiques géométriques et chimiques que les déchets HA produits actuellement, et que leurs caractéristiques radiologiques et thermiques sont « *globalement comparables* ». Selon la stratégie de recyclage retenue, leur volume contribuerait à une augmentation de 10 % à 20 % du volume de déchets HA de l'inventaire de référence (Annexes T5, T7). Enfin, l'Andra estime que les combustibles usés générés en cas de mono-recyclage ou d'arrêt du recyclage auraient pour la plupart des caractéristiques similaires à ceux déjà intégrés à l'inventaire de réserve de Cigéo. Quelques typologies présenteraient toutefois des caractéristiques différentes : les combustibles MOX, qui présentent des longueurs d'assemblage plus élevées que celles des combustibles déjà étudiés dans les études d'adaptabilité, et les combustibles URE, qui présentent un enrichissement en ²³⁵U plus important. En cas de mono-recyclage, l'intégration des assemblages générés conduirait à augmenter d'environ 15 % le nombre d'assemblages REP de l'inventaire de réserve de Cigéo. En cas d'arrêt du recyclage, cette augmentation s'élèverait à environ 30 % (Annexe T7). Par ailleurs, au cours de l'instruction, l'Andra a transmis des éléments relatifs à l'allongement à 60 ans de la durée de fonctionnement de l'ensemble des réacteurs du parc actuel. En particulier, cet allongement conduirait, en cas de multi-recyclage, à environ 3 400 CSD-V supplémentaires et près de 6 000 colis de déchets MA-VL (CSD-C et déchets d'exploitation) par rapport au scénario SR1. L'IRSN souligne les efforts entrepris par l'Andra pour tenir compte d'évolutions importantes de la politique énergétique. **Toutefois, l'IRSN considère que ces éléments ne constituent qu'une évaluation préliminaire des volumes et des caractéristiques des déchets générés par le projet NNF et l'allongement à 60 ans de la durée de fonctionnement du parc, nécessaire à**

l'établissement des études d'adaptabilité. Il appartiendra à l'Andra de mettre à jour ces estimations au fur et à mesure de la consolidation des données apportées par les producteurs de déchets.

3.4. Chroniques de livraison

Les chroniques de livraison sont établies sur la base de grands principes tels que le développement progressif de l'installation et la continuité du stockage à partir de la mise en service lors de la phase pilote. Ce planning prévisionnel de livraison des colis est élaboré en concertation avec les producteurs de déchets, notamment pour prendre en compte leurs contraintes d'entreposage et de transport.



3.4.1. Phase industrielle pilote

L'Andra prévoit de stocker au cours des cinq premières années d'exploitation de la phase industrielle pilote environ 300 colis CBF-C'2, 400 colis CEC, 300 colis CAC, 5 000 colis CSD-C, 800 colis de déchets vitrifiés UMo (CSD-U et CSD-RU) et 3 colis de capsules de titanate de strontium (CSD-S) [66]. Par ailleurs, l'Andra n'exclut pas, en fonction de la durée de la phase pilote et des besoins identifiés, de stocker d'autres types de colis, comme des C1PG^{SP}. Le choix de ces types de colis a été réalisé dans l'objectif d'éprouver lors de la phase industrielle pilote tous les modes de stockage envisagés dans l'installation Cigéo (avec conteneurs de stockage ou en stockage direct, éventuellement en panier de stockage, voir chapitre 3.6). L'IRSN convient que les familles et les nombres de colis primaires retenus présentent une diversité géométrique et physico-chimique permettant d'obtenir un retour d'expérience représentatif des différentes opérations prévues (acceptation¹⁹, contrôles à réception, mise en stockage, retrait, surveillance). L'IRSN relève par ailleurs que l'Andra ne prévoit pas de stocker de colis de déchets bitumés lors de la phase pilote, en cohérence avec l'avis de l'ASN référencé 2013-AV-0179 [21] selon lequel « *les colis de déchets bitumés ne devront pas être stockés dans cette première tranche²⁰ d'exploitation* ». Aussi, **l'IRSN estime que les choix de types de colis retenus par l'Andra pour la phase industrielle pilote sont pertinents dans l'objectif de tester les opérations et modes de stockage au sein de Cigéo en fonctionnement industriel**. En revanche, l'IRSN relève qu'à ce stade, l'Andra n'a pas apporté d'éléments de justification relatifs au nombre de colis de l'inventaire de la phase pilote en lien avec le confortement de la démonstration de sûreté de ces opérations. A cet égard, l'IRSN rappelle, comme indiqué dans son avis 2015-00348 du 6 novembre 2015 relatif au plan de développement des composants du projet Cigéo [28], que les essais à réaliser pendant la phase pilote doivent s'appuyer sur un nombre de colis adéquat en vue d'atteindre le niveau de démonstration requis. Ce sujet est examiné dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo.

3.4.2. Après la phase industrielle pilote

Au-delà de la phase industrielle pilote, l'Andra n'a pas présenté de chronique de livraison détaillée à l'échelle des familles de colis primaires. Des chroniques sont fournies à l'échelle de l'ensemble des colis HA d'une part et des colis MA-VL d'autre part [66]. A ce stade, l'Andra prévoit de stocker l'ensemble des colis MA-VL (hors déchets MA-VL vitrifiés) à l'échéance de 2100 environ. Le stockage en alvéoles HA de déchets MA-VL vitrifiés et de déchets HA est quant à lui prévu entre 2080 et 2150 environ. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que les derniers colis reçus seraient des colis CSD-V (verres UOX/MOX/URE), issus du traitement des combustibles usés de l'EPR de Flamanville, expédiés à Cigéo autour de 2150 après 70 ans de refroidissement. A cet égard, l'IRSN relève que la date de réception des derniers colis CSD-V repose sur une version de 2016 du programme industriel de gestion des déchets (PIGD), dont certaines hypothèses, obsolètes, ne sont plus en cohérence avec la politique énergétique actuelle, telles que la date de mise en service de l'EPR Flamanville dès 2018 ou encore le traitement des combustibles MOX dès 2030.

¹⁹ L'acceptation est définie dans la décision ASN n°2017-DC-0587 [66] comme l'« *acte par lequel l'exploitant d'une INB de stockage matérialise son accord pour le stockage dans son installation d'un colis de déchets radioactifs donné* ».

²⁰ Cette première tranche d'exploitation fait aujourd'hui référence à la phase industrielle pilote.

Sur la base des études d'adaptabilité qu'elle mène, l'Andra mentionne un allongement possible des durées de fonctionnement des installations souterraines et de surface de Cigéo, en lien avec le stockage des déchets de l'inventaire de réserve [80]. Ainsi, l'Andra indique les durées suivantes :

- pour l'ensemble des scénarios considérés, le stockage des colis FA-VL de l'inventaire de réserve conduirait à une augmentation de la durée d'exploitation de 18 ans ;
- pour le scénario SR1, la durée d'exploitation serait rallongée de 10 ans pour les colis de déchets HA supplémentaires et d'un temps négligeable pour les colis de déchets MA-VL supplémentaires, en comparaison au scénario SR2 utilisé pour établir l'inventaire de référence ;
- pour le scénario SNR enveloppe, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que la durée d'exploitation serait également rallongée d'une dizaine d'années, et que les derniers colis reçus seraient des combustibles usés MOX provenant des réacteurs 900 MWe du parc actuel susceptibles de recevoir des assemblages MOX.

L'IRSN note que les hypothèses retenues par l'Andra, pour les durées de fonctionnement relatives au stockage des déchets de l'inventaire de référence et de réserve n'intègrent pas, comme indiqué au chapitre 3.1, d'aléas dus notamment à des retards dans la disponibilité d'un futur parc ou à des problèmes d'exploitation (de Cigéo ou des installations de traitement des combustibles et de conditionnement des déchets).

S'agissant des déchets du projet NNF et de l'allongement à 60 ans de la durée de fonctionnement de tous les réacteurs du parc, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle retenait à ce stade l'horizon 2180 pour la réception des derniers colis, pour les stratégies de multi-recyclage (réception de CSD-V provenant du traitement de combustibles usés MOX) et d'arrêt du recyclage (réception de combustibles usés MOX), en considérant des durées de refroidissement moyennes de 95 ans pour les colis CSD-V et d'environ 120 ans pour les combustibles MOX chargés dans les réacteurs des paliers 900 MWe et 1300 MWe. L'IRSN considère que les hypothèses prises par l'Andra pour estimer la réception des derniers colis autour de 2180 ne sont pas les plus conservatives. En effet, en cas d'arrêt du recyclage et en supposant que le dernier EPR2 serait mis en service en 2044 pour 60 ans et recevrait du combustible MOX jusqu'à son arrêt, l'IRSN relève que le combustible usé MOX ne serait suffisamment refroidi qu'à l'horizon 2220. L'IRSN convient que les évolutions de politique énergétique actuelles et à venir, qui complexifient l'estimation des dates de réception des derniers colis et donc des durées d'exploitation de Cigéo, sont imposées à l'Andra. L'IRSN souligne également que certains choix de gestion du cycle pourraient permettre d'éviter la situation décrite *supra*, en anticipant par exemple un arrêt du recyclage et en chargeant les derniers EPR2 en fonctionnement avec des combustibles nécessitant des durées de refroidissement moindres.

De manière générale, l'IRSN estime que les dates de réception des derniers colis, tant pour l'inventaire de référence que pour l'inventaire de réserve, intégrant ou non les 6 EPR2 et la prolongation à 60 ans du parc de réacteurs actuels, sont très incertaines et vraisemblablement optimistes. Les conséquences de l'allongement de la durée de fonctionnement du stockage sont examinées dans le cadre du GP2.

3.5. Inventaires radiologiques et chimiques

Ce chapitre présente l'examen par l'IRSN de la démarche d'élaboration des inventaires radiologiques et chimiques de Cigéo. Les impacts liés à ces inventaires sont examinés dans le cadre du GP3 relatif à la sûreté après fermeture de Cigéo.

3.5.1. Inventaire radiologique

L'inventaire radiologique est établi sur la base de données transmises par les producteurs dans les dossiers de connaissance : les producteurs doivent déclarer, par famille de colis, les activités de 144 radionucléides. Pour construire l'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation de sûreté après-fermeture, l'inventaire moyen déclaré par les producteurs est associé à une marge tenant compte du niveau de connaissance relatif à chaque

famille de colis. Les étapes suivies par l'Andra pour l'élaboration de l'inventaire radiologique sont les suivantes [51] :

- un niveau de connaissance est attribué à chaque famille de colis sur une échelle de 0 à 3. Le niveau 0 est attribué aux familles pour lesquelles l'Andra ne dispose pas d'éléments, tandis que le niveau 3 est attribué aux familles pour lesquelles l'Andra estime que les incertitudes résiduelles sont faibles. Près de 92 % des colis primaires HA se voient attribuer un niveau de connaissance de 2 ou 3. Parmi les colis primaires MA-VL, près de 51 % ont un niveau de connaissance de 1 et 41 % de 2 ;
- pour les familles dont le niveau de connaissance est de 0²¹, un périmètre d'analogie est défini à partir de familles dont les inventaires radiologiques sont connus, afin d'obtenir une estimation enveloppe des inventaires manquants ;
- pour chaque radionucléide, des facteurs multiplicatifs sont appliqués à l'activité moyenne déclarée selon les niveaux de connaissance (Tableau 3) afin de tenir compte des incertitudes résiduelles.

La même démarche est appliquée pour les colis de l'inventaire de réserve.

Tableau 3. Facteurs multiplicatifs retenus en fonction du niveau de connaissance.

Niveau de connaissance	3	2	1	0
Facteur multiplicatif	1,5	2	5	10

L'IRSN relève que la démarche globale d'élaboration de l'inventaire radiologique n'a pas évolué depuis le DOS et, comme à l'issue de l'examen de ce dernier, considère que celle-ci est satisfaisante. Les niveaux de connaissance retenus par l'Andra, précisés depuis le DOS, intègrent un niveau d'incertitude gradué en cohérence avec la fiabilité des connaissances sur les colis primaires, que **l'IRSN estime raisonnable**.

Sur la base de la méthodologie décrite ci-avant, l'Andra a évalué l'inventaire radiologique pour les 144 radionucléides, sur lequel repose son étude d'impact. Elle fournit l'évolution de l'activité totale des déchets HA et des déchets MA-VL sur un million d'années après la fermeture (Annexe T8) [51] et des dix radionucléides contribuant majoritairement à cette activité totale. Pour l'inventaire de référence, l'activité des déchets HA à la date de fermeture de l'installation, représentant 84 % de l'inventaire radiologique, s'élève à $6,5 \cdot 10^{19}$ Bq. Pour les déchets MA-VL, cette activité est évaluée à $1,2 \cdot 10^{19}$ Bq. L'IRSN ne relève pas de différence significative entre les inventaires radiologiques présentés au stade du DOS et du DDAC pour l'inventaire de référence. L'Andra précise en outre l'activité de 4 radionucléides d'intérêt pour les évaluations de sûreté après-fermeture (Tableau 4) dans les cas de l'inventaire de référence et des inventaires de réserve associés aux scénarios SR1 et SNR enveloppe (intégrant également les déchets FA-VL). L'Andra a également précisé l'inventaire radiologique des déchets du projet NNF pour 3 radionucléides à vie-longue plus particulièrement mobiles dans l'environnement du stockage (Tableau 4), pour les stratégies de multi-recyclage et d'arrêt du recyclage. L'IRSN note que l'intégration des combustibles usés (incluant ceux du projet NNF) conduit à une augmentation forte de l'inventaire radiologique en ¹²⁹I. **L'IRSN estime que les éléments présentés par l'Andra, qui consistent en une agrégation des données des producteurs relatives à 144 radionucléides et intègrent des marges relatives aux incertitudes sur ces données, sont suffisants au stade du DDAC pour l'évaluation de l'impact radiologique de Cigéo associée à l'inventaire de référence et aux inventaires de réserve précités.**

²¹ 2,4 % des colis primaires de l'inventaire de référence ont un niveau de connaissance de 0 (0,5 % des colis HA et 3,1 % des colis MA-VL).

Tableau 4. Inventaire radiologique pour certains radionucléides à la date de fermeture ([51][80] et éléments transmis au cours de l'instruction).

		¹⁴ C	³⁶ Cl	⁷⁹ Se	¹²⁹ I
Inventaire de référence	Activité totale	7,12.10 ¹⁶	3,00.10 ¹⁴	4,87.10 ¹⁴	3,78.10 ¹²
	% de cette activité contenue dans les déchets HA	< 1 %	50 %	93 %	50 %
SR1 + FA-VL	Augmentation par rapport à l'inventaire de référence	3 %	17 %	10 %	16 %
SNR + FA-VL	Augmentation par rapport à l'inventaire de référence	4 %	0 %	4 %	x 24
NNF (multirecyclage)	Augmentation par rapport à l'inventaire de référence	Non précisé	35 %	32 %	33 %
NNF (arrêt du recyclage)	Augmentation par rapport à l'inventaire de référence	Non précisé	Quelques %	14 %	x 31

3.5.2. Inventaire en substances toxiques chimiques

L'inventaire en substances toxiques chimiques retenu par l'Andra comprend l'uranium, le plomb, le mercure, l'antimoine, le cadmium, le sélénium, l'arsenic, le nickel, le chrome, le bore, le béryllium, le cyanure et l'amiante [51]. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que cette liste était fondée sur une analyse réglementaire des critères spécifiques de protection ou de préoccupation pour l'homme et l'environnement (par exemple, directive du parlement européen relative aux eaux destinées à la consommation humaine) et intégrait également les substances couramment utilisées dans l'industrie nucléaire (par exemple, le bore et le béryllium). L'IRSN relève que la liste de substances toxiques chimiques retenues au stade du DDAC est identique à celle retenue au stade du DOS, et qu'il s'agit également de la liste retenue pour les inventaires en substances toxiques chimiques des stockages de surface (**CSM** et **CSA**). Toutefois, certains colis de déchets des inventaires de référence et de réserve de Cigéo (déchets vitrifiés, déchets bitumés, combustibles usés, etc.) diffèrent, par leur type et leur quantité, des colis de déchets stockés dans les installations de surface et sont de ce fait susceptibles de contenir d'autres substances toxiques chimiques, d'un niveau de toxicité élevé pour l'homme et l'environnement et/ou présents en quantités significatives. A titre d'exemple, l'Andra ne tient pas compte des hydrocarbures et de leurs dérivés dans la liste des substances retenues alors qu'à ce stade, environ 40 000 colis de déchets bitumés sont portés à l'inventaire de référence de Cigéo.

S'agissant de l'inventaire quantitatif en substances toxiques chimiques de chaque famille de colis primaires, celui-ci est déclaré par les producteurs de déchets, pour l'ensemble du colis primaire ou en distinguant ses différents composants (déchet, matrice, enveloppe). L'Andra indique que, pour établir l'inventaire considéré dans l'évaluation d'impact après-fermeture, elle agrège les données fournies par les producteurs relatives au déchet uniquement ou, à défaut, au colis primaire²². Pour les familles pour lesquelles l'Andra n'a pas d'information sur les substances toxiques chimiques, elle recourt à des analogies comme dans le cas de l'inventaire radiologique [51]. Les évaluations en substances toxiques chimiques effectuées par l'Andra sur la base de la méthodologie décrite ci-avant (Tableau 5) montrent que pour l'inventaire de référence, les substances toxiques chimiques majoritaires sont le chrome et le nickel, et dans une moindre mesure l'uranium. Le stockage de combustibles usés dans le cadre du scénario SNR enveloppe conduit principalement à une augmentation massive des quantités d'uranium, d'un facteur 88 par rapport à l'inventaire de référence. L'IRSN relève que l'Andra n'a pas présenté, à ce stade, d'évaluation de l'inventaire en substances toxiques chimiques lié aux déchets du projet NNF ou à

²² Pour les dossiers de connaissance fournissant des masses de substances toxiques chimiques à l'échelle des colis primaires dans leur ensemble (déchet, matrice et enveloppe), une masse générique de substances toxiques chimiques établie pour chaque type d'enveloppe primaire est déduite de la déclaration du producteur (sauf pour quelques cas ambigus) [83].

l'allongement à 60 ans de la durée de fonctionnement du parc actuel. Il appartiendra à l'Andra d'intégrer ces éléments dans une version ultérieure de ses études d'adaptabilité.

Tableau 5. Inventaire en substances toxiques chimiques (en tonnes) évalué par l'Andra pour les déchets uniquement [51][80].

Élément	U	Pb	Hg	Sb	Cd	Se	As	Ni	Cr	B	Be	CN ⁻
Référence	314	180	0,589	1,69	33,3	4,89	0,110	2 320	3 410	35,4	51,0	0,00149
Référence + SR1	331	180	0,589	1,90	38,6	5,77	0,111	2 360	3 475	39,3	51,0	0,00149
Référence + SNR enveloppe	28 016	151	0,589	2,07	37,6	5,31	0,110	2 308	3 332	39,6	51,1	0,00149
FA-VL seuls	15,1	5,59	0,156	0,192	0,0291	0,0805	0,0389	12,9	1,32	1,23	0,0144	0

S'agissant de la démarche décrite ci-avant, l'IRSN relève que l'Andra retient préférentiellement l'inventaire déclaré pour le déchet uniquement, alors qu'elle a réalisé des évaluations des masses de substances toxiques chimiques recensées au titre de la matrice et des enveloppes des colis primaires (Tableau 6) [83]. En effet, un grand nombre de colis primaires de l'inventaire de référence sont constitués d'une enveloppe en acier inoxydable (CSD-V, CSD-C, etc.), constituée d'éléments chimiques présents dans la liste retenue par l'Andra (chrome et nickel notamment). La matrice peut également contenir des substances toxiques chimiques (par exemple, le bore dans les matrices vitreuses).

Tableau 6. Inventaire en substances toxiques chimiques (en tonnes) évalué par l'Andra pour les matrices et les enveloppes des colis primaires de l'inventaire de référence [83].

Élément	U	Pb	Hg	Sb	Cd	Se	As	Ni	Cr	B	Be	CN ⁻
Matrice	0,11	4,2	0	0,08	0,01	0	0,42	0,84	4,2	1 010	0,25	0
Enveloppe	0,07	594	0	1,1	0,01	0	0,29	2 125	3 547	0,58	0,17	0

Au vu de ces estimations (Tableau 6), conduisant à une augmentation significative des masses de certaines substances toxiques chimiques par rapport à ce qui est retenu par l'Andra dans ses évaluations d'impact (par exemple, d'un facteur 2 pour le chrome et le nickel, d'un facteur 4 pour le plomb ou encore d'un facteur 30 pour le bore), l'IRSN estime que l'Andra devrait intégrer, dans l'inventaire en substances toxiques chimiques retenu pour les évaluations de sûreté, l'ensemble des composants des colis primaires de déchets. Par ailleurs, l'Andra a réalisé une évaluation des substances toxiques chimiques contenues dans les conteneurs de stockage en acier et en béton prévus pour les colis de déchets de l'inventaire de référence. L'IRSN note que l'intégration des substances contenues dans les conteneurs de stockage conduit à une augmentation de l'inventaire en substances toxiques chimiques moindre que l'intégration de l'ensemble des éléments des colis primaires. Toutefois, l'IRSN estime que l'Andra pourrait élargir cette démarche aux substances présentes en quantités importantes dans le stockage bien qu'elles soient réputées globalement peu toxiques (le fer des aciers par exemple) ainsi qu'aux autres composants ouvragés tels que ceux du génie civil, afin de justifier de leur non prise en compte.

En outre, l'Andra présente la spéciation majoritaire des substances toxiques chimiques retenues, en fonction des conditions physico-chimiques attendues dans les alvéoles de stockage et dans les argilites du COX [81][82]. Ce type de données est utile dans la démarche d'évaluation de l'impact chimique puisque le niveau de toxicité d'une substance dépend de sa forme physico-chimique. Néanmoins, l'IRSN estime qu'il convient de ne pas se restreindre à la spéciation majoritaire, d'autres formes physico-chimiques de la substance, présentes en quantités moindres, pouvant présenter une toxicité plus élevée. A cet égard, une attention particulière doit être portée aux formes organiques, qui n'ont à ce stade pas été considérées dans l'identification des formes physico-chimiques d'intérêt pour l'évaluation de l'impact chimique. Aussi, l'IRSN considère que la liste de spéciation

majoritaire établie par l'Andra en appui à l'évaluation d'impact devra être consolidée pour *in fine* contenir les formes physico-chimiques les plus toxiques et probables, de manière raisonnablement enveloppe.

Par ailleurs, l'IRSN relève qu'aucune marge n'est appliquée aux données relatives aux substances toxiques chimiques déclarées par les producteurs, contrairement aux données relatives aux inventaires radiologiques (*via* des niveaux de connaissance, voir chapitre 3.5.1 ci-avant). En effet, l'Andra estime qu'il n'est pas nécessaire de prendre des marges sur les substances toxiques chimiques, ce qu'elle justifie sur la base de quelques exemples pour lesquels les producteurs déclarent des quantités présentant globalement des majorations significatives. L'IRSN estime que ces éléments ne permettent pas à l'Andra de s'assurer que les déclarations des producteurs sont systématiquement enveloppées des quantités de substances toxiques chimiques présentes dans leurs colis, et que l'Andra devrait adopter une méthodologie plus proche de celle retenue pour établir l'inventaire radiologique.

Aussi, l'IRSN estime qu'à ce stade, la méthodologie retenue par l'Andra permet d'établir une première évaluation de l'inventaire en substances toxiques chimiques de Cigéo, utile pour les études d'impact de l'installation, mais que cette méthodologie devra être consolidée dans l'objectif de justifier du caractère raisonnablement enveloppe de cet inventaire. En conséquence, l'IRSN considère que l'Andra devra, avant l'enquête publique, présenter un programme d'étude visant à consolider l'inventaire en substances toxiques chimiques à considérer pour l'étude d'impact de Cigéo, sur la base d'une méthodologie révisée qui tient compte notamment :

- des substances chimiques fortement toxiques ou introduites en quantité importante dans le stockage, issues *a minima* des différents composants des colis primaires de déchets (déchets, matrice et contenant) ;
- de manière conservative, des formes physico-chimiques les plus probables de ces substances dans le stockage ;
- d'une discrimination du niveau de confiance attribué aux données déclarées par les producteurs de déchets et de marges associées.

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E3** de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

3.6. Modes de stockage des colis primaires

L'Andra prévoit de placer tous les colis primaires HA dans des conteneurs de stockage en acier. Pour les colis primaires MA-VL, deux options sont envisagées : le stockage en conteneur de stockage en béton ou en acier, et le stockage direct, sans conteneur de stockage. Ces conteneurs de stockage sont décrits au chapitre 2.3.2 du présent rapport. Les fonctions et exigences de sûreté associées à ces conteneurs ainsi que la justification de l'atteinte de leurs performances sont examinées dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo.

Le stockage direct concerne certaines familles, pour lesquelles l'Andra estime que le colis primaire satisfait aux fonctions de sûreté attribuées à un colis de stockage MA-VL, à savoir le colis primaire et son conteneur de stockage [51]. Deux configurations de stockage direct sont retenues par l'Andra : le stockage du colis primaire seul ou le stockage de plusieurs colis primaires dans un panier de stockage afin de faciliter leur manutention et leur gerbage. L'Andra précise toutefois qu'au titre de la flexibilité, un conteneur de stockage est prévu pour les familles dont le stockage direct est l'option de référence.

Certains colis de type CSD-C, C1PG^{SP}, CBF-C'2, 870 L FI et 500 L FI [51] sont pour l'instant identifiés par l'Andra comme éligibles à un stockage direct. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé qu'une trentaine de familles étaient concernées. A ce stade, l'éligibilité de ces familles a été analysée par l'Andra sur la base de la connaissance dont elle dispose sur les colis, en se focalisant sur la phase d'exploitation de l'installation. L'analyse de l'Andra n'a pas été portée à la connaissance de l'IRSN. Par conséquent, l'IRSN n'est pas en mesure de se prononcer sur l'éligibilité au stockage direct des familles identifiées par l'Andra. De manière générale, l'IRSN souligne que

l'éligibilité au stockage direct de certaines familles de colis anciens, qui n'ont pas été produites sous assurance qualité (5 familles concernées) ou n'ont pas fait l'objet d'un accord de conditionnement avant leur production (10 familles supplémentaires concernées), pourrait poser des difficultés. De même, certains colis encore en cours de production présentent des enjeux particuliers pouvant remettre en cause la possibilité de les stocker sans conteneur de stockage. A titre d'exemple, l'IRSN a estimé, dans son avis n°2020-00126 [79], que le maintien des performances mécaniques des colis 870 L pendant la phase d'exploitation de Cigéo n'était pas acquis, en raison d'incertitudes liées à la corrosion de leurs conteneurs en acier noir et que, par conséquent, la possibilité de les stocker directement restait à démontrer. L'IRSN note toutefois qu'à ce stade, l'Andra ne prévoit de mettre en stockage direct que la moitié de l'inventaire des colis 870 L.

Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que le choix de mettre certains colis primaires en stockage direct reposait également sur le volet technico-économique de cette analyse. L'IRSN convient que le stockage direct constitue une voie d'optimisation du nombre d'alvéoles MA-VL. En effet, l'IRSN a évalué que le volume représenté par les 42 000 m³ de colis primaires envisagés pour un stockage direct, s'ils étaient mis en conteneur de stockage, s'élève à plus de 200 000 m³. Cette évaluation a été réalisée sur la base des hypothèses disponibles dans le DDAC, notamment le type de conteneur de stockage retenu pour chaque famille.

En tout état de cause, l'IRSN considère qu'il appartiendra à l'Andra, pour chaque famille envisagée en stockage direct, de fournir une démonstration spécifique de son éligibilité, notamment sur la base des spécifications préliminaires d'acceptation liées à ce mode de stockage, et de présenter les contrôles qui y seront associés. A cet égard, l'IRSN souligne dès à présent l'importance de s'assurer de la pertinence des critères retenus dans ces spécifications et de leur caractère contrôlable. Ces points sont examinés dans le cadre du GP2, seule la démarche d'élaboration des spécifications faisant l'objet de la présente instruction relative au GP1.

3.7. Spécifications préliminaires d'acceptation

Les spécifications d'acceptation définissent les critères qu'un colis primaire doit respecter pour être accepté dans l'installation, de sa réception à sa mise en alvéole de stockage. Elles portent sur les caractéristiques radiologiques, physiques, thermiques, chimiques et mécaniques des colis primaires. Le présent chapitre concerne la démarche retenue par l'Andra pour élaborer les spécifications préliminaires d'acceptation ainsi que la structuration de ces spécifications. Le lien entre les spécifications d'acceptation et la démonstration de sûreté de l'installation Cigéo fait l'objet d'une analyse dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo.

3.7.1. Démarche générale pour les colis primaires de l'inventaire de référence

Pour établir les spécifications d'acceptation des colis primaires de l'inventaire de référence, l'Andra a mis en œuvre une démarche itérative, reliant la connaissance des colis, la conception de l'installation et la démonstration de sûreté associée. **Cette démarche a été examinée par l'IRSN dans le cadre de l'examen du DOS de Cigéo et n'appelle pas de remarque [30].**

Les spécifications d'acceptation présentées dans le DDAC [84] s'appliquent aux colis primaires HA et MA-VL de l'inventaire de référence. Elles sont déclinées en deux types de spécifications, que les colis primaires doivent respecter conjointement pour être acceptés dans l'installation : les spécifications générales applicables à tous les colis primaires et les spécifications particulières définies par quartier de stockage et par mode de stockage. Les spécifications générales portent sur l'inventaire radiologique, l'inventaire chimique et la nature des substances autorisées, les connaissances relatives au comportement à long-terme (notamment les données pour établir les modèles de relâchement), la contamination surfacique, le taux de vide et l'interface de préhension. Les spécifications particulières sont scindées en quatre catégories, selon les quartiers et les modes de stockage : stockage direct en alvéole MA-VL, stockage en conteneur de stockage en alvéole MA-VL, stockage dans le quartier pilote HA et stockage dans le quartier HA. Quel que soit le quartier de stockage et le mode de stockage, celles-ci portent sur la masse et la géométrie du colis primaire, le débit de dose, la masse de matière fissile, le dégagement de radionucléides gazeux, la puissance thermique, les caractéristiques relatives au confinement

statique et le comportement en cas de chute. Pour le stockage en alvéole MA-VL (direct ou en conteneur de stockage), une spécification porte sur le dégagement de gaz inflammable produit par radiolyse et par corrosion. Enfin, en cas de stockage direct, des spécifications portent sur le comportement en cas de sollicitation thermique et sur la tenue au gerbage. **L'IRSN estime que la structuration des spécifications, intégrant les différents modes de stockage des colis primaires, est satisfaisante. Par ailleurs, l'IRSN estime, au stade du GP1, que le choix des thématiques faisant l'objet de critères spécifiés (puissance thermique, débit de gaz de radiolyse dégagé, débit de dose, etc.) apparaît pertinent, et permet à l'Andra de cibler les enjeux principaux en lien avec le dimensionnement et la démonstration de sûreté de Cigéo.**

3.7.2. Colis primaires de l'inventaire de réserve

En l'absence de spécifications préliminaires d'acceptation pour les colis primaires de l'inventaire de réserve, l'Andra recourt pour alimenter les études d'adaptabilité à la notion de « grandeurs caractéristiques » pour ces colis, qui sont déterminées sur la base des caractéristiques connues des colis [51]. Elles visent en particulier à dimensionner l'installation Cigéo, vis-à-vis des fonctions de sûreté liées aux colis en phase d'exploitation. Les grandeurs caractéristiques retenues doivent donc couvrir la variabilité des colis primaires, en considérant les familles dont les propriétés sont enveloppes vis-à-vis de ces fonctions de sûreté. Par exemple, l'Andra retient les familles présentant les inventaires radiologiques, les masses de matière fissile, les puissances thermiques et les débits d'hydrogène les plus importants. **Ces éléments n'appellent pas de remarque de l'IRSN.**

3.8. Conclusion

S'agissant de l'inventaire de référence, l'IRSN estime que les connaissances présentées par l'Andra en termes notamment de volume, de typologie de déchets et d'inventaire radiologique, constituent un socle approprié pour dimensionner l'installation Cigéo et en évaluer la sûreté. Toutefois, des incertitudes notables pouvant impacter le nombre d'alvéoles et les chroniques de stockage persistent, liées notamment aux conditionnements restant à définir pour une partie significative des déchets MA-VL (boues de STE2 et colis PIVIC notamment), aux modes de stockage (avec ou sans conteneur de stockage), ainsi qu'à la faisabilité du traitement des combustibles usés MOX et du CEA. Aussi, la capacité à parer à ces incertitudes, qui relève du caractère flexible de l'installation, constitue un point d'attention en termes de conséquences potentielles sur la sûreté en exploitation, dont l'examen fait l'objet du GP2.

L'IRSN considère en outre que les données réunies par l'Andra, relatives aux déchets de l'inventaire de réserve, sont globalement suffisantes pour fonder les études d'adaptabilité de Cigéo aux scénarios industriels prospectifs retenus dans le DDAC, qui sont bien cohérents avec la PPE formellement en vigueur à ce jour. L'IRSN souligne les efforts de l'Andra pour les compléter en vue d'évaluer de manière préliminaire l'adaptabilité de Cigéo aux principales évolutions récemment annoncées de la PPE (prolongement à 60 ans de la durée de fonctionnement de l'ensemble du parc actuel, et développement d'un parc de six EPR2). Les conséquences de ces évolutions en termes notamment d'emprise du stockage sont abordées au chapitre 9 relatif à l'adaptabilité de Cigéo. Cet examen de l'adaptabilité de Cigéo est complété dans le cadre des GP2 et GP3 au regard d'autres enjeux relatifs à la sûreté de l'installation en exploitation, dont l'allongement de la durée de fonctionnement, et après sa fermeture.

4. LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE EN SURFACE ET SUBSURFACE

Le présent chapitre porte sur l'état des connaissances relatives au site de Meuse/Haute-Marne en surface et subsurface, en particulier aux nappes de l'aquifère superficiel du Barrois, aux terrains d'assise et à l'état initial de l'environnement, réuni par l'Andra dans l'objectif d'établir les modalités de surveillance de Cigéo et d'évaluer la sûreté de ses installations de surface vis-à-vis des risques géotechniques. L'ensemble de ces connaissances est évalué au chapitre 4.1. Les niveaux d'aléas naturels retenus pour le dimensionnement des installations de surface font l'objet du chapitre 4.2.

4.1. Connaissances du site en surface et subsurface

4.1.1. Aquifère superficiel du Barrois

La formation des calcaires du Barrois est la seule formation aquifère dont la productivité est suffisante localement pour envisager une utilisation telle qu'une alimentation en eau potable, ou une exploitation industrielle ou agricole, qui soit susceptible d'être impactée par les activités liées à Cigéo. Le présent chapitre porte sur la connaissance de cet aquifère en termes d'hydrodynamique et d'hydrogéochimie. Les risques de remontée de nappe vers les installations de surface et souterraines associés à cette formation sont pour leur part examinés au titre de l'aléa d'inondation externe (cf. chapitre 4.2.1).

Les calcaires du Barrois sont constitués de plusieurs niveaux aquifères séparés par des niveaux marneux ou des niveaux massifs. Ces niveaux aquifères sont occupés par deux nappes au droit du site de Cigéo, de haut en bas :

- une nappe dans les calcaires de Dommartin, libre au droit de la zone puits ;
- une nappe dans les calcaires sublithographiques, libre au droit de la zone descenderie et présentant une épaisseur saturée d'une dizaine de mètres en période de hautes eaux ; au droit de la zone puits, cette nappe d'une vingtaine de mètres d'épaisseur est maintenue captive sous la formation de la pierre châlaine.

Plus au nord dans le secteur de MHM, une troisième nappe est présente dans les calcaires cariés/calcaires tâchetés, séparée des calcaires de Dommartin sous-jacents par la présence du banc massif de l'oolithe de Bure.

Alimentées par l'infiltration d'eau pluviale, ces différentes nappes s'écoulent vers le Nord et sont drainées par des sources situées dans les vallées qui entaillent les calcaires du Barrois. Elles sont également en relation avec les cours d'eau, notamment à la faveur de karsts²³ à l'origine de nombreuses pertes et résurgences.

Les calcaires du Barrois sont altérés en surface et présentent un degré élevé de fracturation ; les valeurs de perméabilité sont de fait comprises entre 10^{-7} et 10^{-4} m/s, voire supérieures au droit des zones karstifiées.

Caractérisation hydrogéologique de l'aquifère du Barrois

En complément des éléments présentés au stade du DOS, l'Andra présente dans le DDAC [37] des coupes décrivant le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère du Barrois, comprenant notamment une synthèse de ses relations avec les ruisseaux de l'Orge, de La Bureau et de l'Ormançon. Des chroniques piézométriques des différentes nappes du Barrois sont par ailleurs présentées dans le document [87]. Au cours de l'expertise, l'Andra a précisé que le réseau piézométrique sur lequel sont basées ces chroniques est désormais constitué de 37 piézomètres de suivi en continu des niveaux de nappe et de 3 piézomètres de suivi manuel (contre respectivement 23 et 4 piézomètres au stade du DOS). 10 piézomètres ayant dû être abandonnés sur la zone des puits par suite d'actes de malveillance lors de l'occupation du bois Lejuc, ce réseau s'est principalement développé en zone descenderie par l'ajout de piézomètres lors des campagnes géotechniques.

²³ La karstification est un processus de dissolution des roches carbonatées au contact de l'eau d'infiltration, chargée en gaz carbonique. Cette dissolution élargit progressivement les vides initiaux dans lesquels elle circule (porosité de la roche, fractures, interbancaux...), en façonnant les parois et les agrandissant jusqu'à créer de véritables chenaux et cavités qui facilitent l'infiltration et accentuent le processus amorcé.

Par ailleurs, dans l'objectif d'améliorer la modélisation hydrogéologique des calcaires du Barrois, l'Andra prévoit [88] un nouveau programme de caractérisation de cet aquifère basé sur de nouveaux forages, des campagnes piézométriques élargies, une instrumentation des exutoires de la nappe, des campagnes de traçages, d'analyses hydrochimiques et de bilans hydrologiques. Une synthèse de ces travaux est envisagée à l'horizon 2027.

L'IRSN note que malgré l'acquisition de données supplémentaires sur l'hydrogéologie locale du Barrois au niveau de la zone descendrière par rapport à celles réunies au stade du DOS, le contexte hydrogéologique à proximité de la zone puits (cf. Annexe T9) reste, pour sa part, fondé sur un état des connaissances datant du DOS, cette zone n'ayant pu faire l'objet des investigations initialement envisagées du fait des actes de malveillance mentionnés ci-avant. Ainsi, à ce stade, les éléments présentés ne permettent pas de distinguer les écoulements des deux nappes présentes dans cette zone, ni d'appréhender les fluctuations piézométriques de ces dernières. Or ces connaissances sont d'intérêt pour les évaluations (expertisées dans le cadre du GP2) de l'impact des installations de surface sur les eaux souterraines et du risque d'inondation externe. Ces connaissances sont également nécessaires pour assurer la pertinence du réseau de surveillance envisagé pour suivre les effets du creusement et de l'exploitation de Cigéo (cf. ci-dessous). **Aussi, l'IRSN considère que la caractérisation des nappes des calcaires sublithographiques et des calcaires de Dommartin reste, à ce stade, insuffisante pour bien appréhender le fonctionnement de l'aquifère du Barrois au droit des futures zones d'implantation de Cigéo.**

A ce titre, l'IRSN considère que les grands axes du programme complémentaire de caractérisation des calcaires du Barrois envisagé par l'Andra sont satisfaisants. Toutefois, l'Andra devra porter une attention particulière à la différenciation entre la nappe des calcaires sublithographiques et la nappe des calcaires de Dommartin lors de l'ajout de nouveaux forages et devra s'assurer de la bonne connexion des ouvrages aux réseaux de fractures des calcaires. En outre, il conviendrait que la synthèse de ces résultats intègre l'ensemble des jaugeages et traçages réalisés autour du site et présente des coupes représentatives de l'aquifère au droit de la zone descendrière et de la zone puits.

Surveillance de l'aquifère du Barrois

En réponse à son engagement [2017-E-59 – point 3] visant à « *décrire et présenter les modalités de surveillance des nappes des calcaires du Barrois à déployer autour des installations cibles* », l'Andra indique que des piézomètres de surveillance, installés en amont et en aval hydraulique des installations de surface de Cigéo, feront l'objet de prélèvements mensuels à annuels pour la surveillance chimique (paramètres physico-chimiques faisant l'objet d'une valeur réglementaire limite et substances susceptibles de caractériser une éventuelle pollution de la nappe compte tenu des activités) et radiologique (α_{global} , β_{global} , ^3H , ^{14}C et potassium) des eaux souterraines. L'Andra précise que le choix des ouvrages existants ou futurs à intégrer au plan de surveillance ainsi que la différenciation des ouvrages utilisés pour chaque niveau de nappe au sein des calcaires du Barrois seront définis ultérieurement et tiendront compte des résultats du programme à venir de poursuite de la caractérisation de cet aquifère (cf. chapitre 4.1.2).

L'IRSN estime que les éléments présentés par l'Andra concernant le programme de surveillance de la qualité des eaux de la nappe des calcaires du Barrois sont pertinents à ce stade, mais devront être complétés avant la mise en service lors de la phase pilote par des informations plus précises concernant notamment le nombre et la localisation des points de mesure associés à ce plan de surveillance. A cet égard, ce plan devra tenir compte des conclusions des futures expérimentations envisagées par l'Andra pour étudier le comportement des verses, identifiées dès le stade du DOS comme source potentielle de contamination chimique et examinées plus en détail au chapitre 4.1.3 du présent rapport. Par ailleurs, l'IRSN considère que le plan de surveillance de la nappe doit également permettre de s'assurer d'un suivi des niveaux piézométriques autour des installations, notamment au voisinage des liaisons jour-fond.

Eu égard à l'ensemble des éléments présentés ci-dessus, l'IRSN considère que des compléments nécessitent d'être apportés afin notamment de distinguer les écoulements des deux nappes présentes dans le Barrois et d'appréhender les fluctuations piézométriques de ces nappes. Aussi, l'IRSN considère que préalablement à la mise en service lors de la phase pilote, l'Andra devra transmettre :

- **les résultats des investigations et études complémentaires qui auront été mises en œuvre pour compléter la caractérisation des calcaires du Barrois. La synthèse de ces éléments, prévue à l’horizon 2027, devra notamment permettre de distinguer les différentes nappes présentes au niveau des zones puits et descenderies de Cigéo ;**
- **un programme de surveillance des nappes du Barrois actualisé sur la base des conclusions de la synthèse prévue à l’horizon 2027 et des futures expérimentations envisagées pour étudier le comportement des verses.**

Ce point fait l’objet de l’**engagement 2024-E4** de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L’IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

4.1.2. Caractérisations géotechniques en zone de descenderie et en zone puits

Au vu du contexte géologique observé proche de la surface, les principaux risques géotechniques pour les installations de surface du projet Cigéo correspondent à des défauts de stabilité du sol pouvant entraîner une instabilité des infrastructures, liés à des altérations avancées et un taux de fracturation élevé des calcaires du Barrois ou à la présence de cavités karstiques. L’Andra présente à ce titre, dans le DDAC, les résultats d’investigations réalisées au droit de la zone descenderie. Pour la zone puits, ainsi qu’indiqué *supra*, l’Andra n’a pas pu mener à bien la campagne d’investigations envisagée (cf. chapitre 2.2.1.1) mais prévoit de mettre en œuvre de nouvelles investigations à l’horizon 2025, avec une fin des études prévue pour mi-2026.

Caractérisations dans la zone de descenderie

Au droit de la zone descenderie (cf. chapitre 2.2.1.2), les bâtiments abritant des Eléments ou Activités Important(e)s pour la Protection (EIP, AIP) correspondent au bâtiment EP1 qui recevra les colis de déchets ainsi qu’aux ouvrages des têtes de descenderies « colis » et « service ». L’analyse de l’IRSN se concentre ainsi principalement sur les investigations menées à proximité de ces ouvrages.

Le bâtiment EP1 est composé de blocs en béton armé séparés par des joints de dilatation reposant sur un radier et un tapis drainant. La cote finie des terrassements en déblais prévue est située à 356,3 m NGF et la cote supérieure du radier est à 358 m NGF. Des approfondissements de terrassements sont prévus au droit de deux blocs dont le niveau fini en déblais est prévu à la cote de 347,5 m NGF. Sur la partie nord, un remblaiement sera mis en œuvre et le bâtiment sera en partie enterré. Le bâtiment de la tête de descenderie « colis » est composé de six blocs en béton armé reposant sur un radier dont la cote supérieure sera identique à celle d’EP1. Dans la partie sud de ce bâtiment, une fosse sera réalisée. La tête de descenderie « service » sera composée de quatre bâtiments en béton armé accolés les uns aux autres et fondés sur radier.

L’Andra présente une synthèse des campagnes géotechniques réalisées au droit de la zone descenderie dans [89] [90], éléments complétés au cours de l’instruction par [91], [92] et [93]. Ces campagnes géotechniques ont inclus la réalisation de sondages carottés, de sondages destructifs avec essais pressiométriques²⁴, des essais cross-hole et down-hole²⁵ sur un triplet de sondages au droit du bâtiment EP1 et des têtes de descenderie « service » et « colis », ainsi que des sondages à la pelle mécanique et des mesures géophysiques (profils de sismique réfraction) au droit du bâtiment EP1 et de la tête de descenderie « colis ». Ces investigations ont permis de distinguer, depuis la surface, des terrains de couverture sur 1,5 à 5 m d’épaisseur, les trois faciès calcaires du

²⁴ Un essai pressiométrique est un essai de chargement *in situ* dans un forage. L’analyse des résultats permet d’obtenir, à une profondeur donnée, les caractéristiques mécaniques du sol : pression à la rupture (pression limite), pression de fluage et module pressiométrique E_m .

²⁵ Les essais cross-hole et down-hole consistent à mesurer la vitesse des ondes sismiques longitudinales (ondes P) et transversales (ondes S) se propageant depuis une source sismique placée dans un sondage émetteur jusqu’à un sondage récepteur dans lequel sont placés des géophones afin de déterminer des modules dynamiques entrant en compte dans le dimensionnement des structures. Les essais sont réalisés classiquement en triplet de sondages (1 sondage émetteur et 2 sondages récepteur).

Barrois plus ou moins fracturés jusqu'à 16 à 28 m de profondeur²⁶ puis des marnes à intercalations de calcaire marneux correspondant aux marnes du Kimméridgien.

Sur la base des résultats obtenus, l'Andra a établi un modèle géotechnique représentant cinq unités dont les épaisseurs retenues varient selon les blocs des bâtiments : les terrains de couverture (blocs calcaires dans une matrice argileuse), les calcaires du Barrois très fracturés (CF1), fracturés (CF2) et sains (CS) ainsi que les marnes du Kimméridgien (alternances marno-calcaires). Vis-à-vis du risque de cavités karstiques, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que peu de zones karstifiées ayant été identifiées dans la partie inférieure des calcaires du Barrois, aucune cavité de grande taille (cavité visitable) n'est attendue sur les zones sur lesquelles reposera le bâtiment EP1 et ajoute que des reconnaissances visuelles des fonds de fouille seront réalisées en vue de la mise en œuvre de traitements en cas de détection de vides à combler. En outre, l'Andra a précisé, au cours de l'instruction, qu'au vu de la taille généralement inframétrique des cavités potentielles, les méthodes géophysiques telles que la micro-gravimétrie ne permettraient pas d'identifier des structures au niveau de la zone descendrière et qu'aucune investigation complémentaire n'est prévue dans cette zone.

L'IRSN relève qu'aucun sondage n'a été réalisé au droit de plusieurs blocs constitutifs du bâtiment EP1 (partie Ouest, cf. Annexe T9) et qu'au droit des sondages mis en œuvre, des calcaires altérés sont parfois observés à des profondeurs dépassant la cote de terrassement prévue. Par ailleurs, l'IRSN considère que, du fait de leur nombre limité, les sondages réalisés ne permettent pas de détecter toutes les zones de faiblesse du rocher sous les terrains d'assise et, en particulier, d'évaluer le risque d'instabilité sur le bâti lié à la présence éventuelle de cavités karstiques. Enfin, l'IRSN souligne que, s'il n'est effectivement pas possible de détecter des cavités inframétriques, la méthode de micro-gravimétrie permet de détecter, avec un maillage adapté, des cavités présentant des rayons d'ordre métrique²⁷ jusqu'à environ 20 m de profondeur [94] et pourrait à ce titre détecter, après terrassement et sous l'emprise des bâtiments, les types d'anomalies qualifiées par l'Andra de « karsts de dissolution de petite taille » [90].

Aussi, compte tenu de l'absence d'investigations sur la partie ouest du bâtiment EP1 et de l'identification sous l'emprise du bâtiment d'horizons altérés à des profondeurs inférieures à la cote du radier, **l'IRSN considère que les campagnes géotechniques réalisées par l'Andra ne sont pas suffisantes pour exclure a priori la présence de cavités sous les futurs bâtiments de la zone descendrière et que la mise en œuvre d'une méthode géophysique de type campagne de micro-gravimétrie, si besoin complétée par des forages, sera nécessaire au droit du bâtiment EP1 et de la tête de descendrière « colis » à l'issue des travaux d'excavation.** Ce point est repris dans la conclusion *infra*. S'agissant de la tête de descendrière « services », l'IRSN considère que sa faible extension géographique et le fait qu'elle ne possède que très peu de parties enterrées ne justifient pas la nécessité de procéder à ce type d'investigations.

S'agissant enfin du modèle géotechnique retenu, l'IRSN note que l'Andra ne retient pas de modèle global en raison de la trop grande variation d'épaisseur des calcaires très fracturés et fissurés sur les différents sondages. La démarche de l'Andra consistant à prendre en compte pour chaque bloc les épaisseurs de calcaires les plus défavorables relevées à proximité permet de tenir compte des horizons les plus altérés identifiés, **ce qui est satisfaisant.** En tout état de cause, l'IRSN souligne que selon l'état de fracturation ou d'altération des calcaires sous les niveaux de fondation, une substitution de la formation en place ou un approfondissement de la cote d'assise pourrait être nécessaire pour assurer la stabilité des bâtiments de la zone descendrière.

Caractérisations dans la zone puits

A ce stade du projet, seuls une prospection géophysique par sismique réfraction et trois sondages destructifs ont été réalisés sur la zone puits. Cependant, l'Andra prévoit de réaliser une quarantaine de forages et de nouveaux

²⁶ Des passages de calcaires fortement altérés au sein du Barrois ont été identifiés sur 20 sondages au droit du bâtiment EP1 et des têtes de descendrière à des profondeurs variant de 5 à 20 m.

²⁷ L'espacement entre deux points de mesure permet de détecter des vides de dimensions au moins supérieures à la moitié de la maille : pour une cavité sphérique de rayon R et un espacement de 2 m entre les points de mesure, les investigations permettent de détecter des cavités de rayon R ≥ 1 m.

profils de sismique réfraction. **L'IRSN estime que l'Andra devra transmettre les résultats de ces investigations dans les meilleurs délais.**

L'Andra retient une stratigraphie comportant six faciès définis à l'aide de la campagne de prospection géophysique, comprenant des terrains de couverture (CMA) sur 5 à 10 m d'épaisseur, des calcaires de Dommartin très fracturés (CDI1) à fissurés (CDI2) sur 16 à 30 m d'épaisseur, la pierre châline (CS1), des calcaires sublithographiques sains ou peu fracturés (CS2) sur environ 10 m d'épaisseur et des marnes du Kimmeridgien (MK). A chacun de ces faciès, l'Andra a attribué des caractéristiques géotechniques qu'elle estime conservatives à partir d'avis d'experts.

L'IRSN constate que les paramètres dynamiques retenus par l'Andra pour les calcaires du Dommartin sont identiques à ceux retenus au niveau du bâtiment EP1 de la zone descendrière pour les calcaires sublithographiques mais que les paramètres statiques, notamment les paramètres pressiométriques, présentent des valeurs plus faibles que celles retenues pour la zone descendrière, ce qui est cohérent avec le fait que les calcaires de Dommartin ont été identifiés comme pouvant présenter des réseaux karstiques développés. **Ainsi, les caractéristiques géotechniques prises en compte par l'Andra apparaissent satisfaisantes à ce stade, mais l'IRSN rappelle que ces dernières devront être actualisées pour tenir compte des investigations prévues sur la zone puits.**

Enfin, l'épaisseur de calcaires du Barrois traversée sur la zone puits étant bien plus importante que celle traversée au niveau de la zone descendrière, il conviendra de porter une attention particulière à la caractérisation des zones d'écoulement au sein de ces calcaires lors de la foration des puits. Ces éléments sont abordés au chapitre 4.2.1 relatif à l'aléa inondation d'origine externe.

Eu égard à l'ensemble des éléments présentés ci-dessus, l'IRSN considère que des compléments sont attendus concernant la caractérisation géotechnique au droit de la zone descendrière et de la zone puits. Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, dans les meilleurs délais, transmettre les résultats des investigations géotechniques prévues sur la zone puits. L'Andra devra également, à la suite des terrassements des installations de surface et avant la coulée des premiers bétons :

- réaliser des investigations géophysiques, le cas échéant complétées par des forages, pour caractériser d'éventuelles cavités karstiques sous-jacentes qui pourraient remettre en cause la tenue structurelle du bâtiment EP1 et de la tête de descendrière « colis » ainsi que, en fonction des enjeux de sûreté, au droit des infrastructures associées aux puits ;
- transmettre un rapport de synthèse des résultats des contrôles du rocher et des traitements réalisés le cas échéant en fond de fouille.

Ces points font l'objet des **engagements 2024-E5** et **2024-E6** de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que ces engagements sont globalement satisfaisants mais rappelle que les caractérisations complémentaires mentionnées devront permettre de détecter les cavités et autres anomalies dans les calcaires du barrois qui pourraient être préjudiciables aux ouvrages précités.

4.1.3. État initial de l'environnement

Conformément au 2° du II de l'article R. 122-5 du code de l'environnement, l'Andra a joint au DDAC une étude d'impact comprenant notamment une description de l'état initial de l'environnement sur les périmètres concernés par le projet global Cigéo [95]. La constitution de cet état initial, vis-à-vis des substances attendues dans les installations de surface nucléaires et non nucléaires, vise à faciliter l'analyse des résultats qui seront issus de la surveillance de Cigéo afin d'identifier la part éventuelle d'une pollution qui serait apportée à l'avenir par ces installations. Elle s'est notamment appuyée sur l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE), créé en 2007 par l'Andra, qui regroupe un ensemble de moyens d'observation et de conservation d'échantillons de l'environnement couvrant 900 km² et ciblant plus particulièrement les aires autour des futures installations de surface de Cigéo. L'examen par l'IRSN porte essentiellement sur les caractérisations radiologiques et chimiques initiales du site et de son voisinage.

L'Andra a entrepris [95] depuis les débuts du projet de stockage géologique de caractériser l'état initial radiologique de l'environnement dans le secteur de MHM. Pour cela, des caractérisations de différentes matrices²⁸ des compartiments atmosphérique, pédologique (sol et sous-sol), aquatique (eaux superficielles et souterraines) et biologique (denrées alimentaires et autres matrices environnementales solides) ont été mises en œuvre.

Les résultats obtenus jusqu'à ce jour, détaillés en Annexe T10, montrent des niveaux de radioactivité :

- similaires à la moyenne nationale pour les mesures réalisées dans l'atmosphère (éléments d'origine naturelle et artificielle analysés en continu depuis 2011) ;
- cohérents avec les formations géologiques et l'historique nucléaire pour les sols (campagnes entre 2007 et 2013) et le sous-sol (campagnes au LSMHM entre 1994 et 2008) ;
- cohérents avec le bruit de fond naturel et les valeurs publiées dans le Réseau National de Mesure de la radioactivité dans l'environnement (RNM) dans les eaux souterraines (et inférieurs aux limites de détection pour le ¹³⁷Cs et le ³H dans l'aquifère du Barrois) ;
- faibles et en accord avec les niveaux nationaux habituels pour les radionucléides d'origine artificielle pour ce qui est des prélèvements biologiques (les mesures révélant majoritairement des radionucléides d'origine naturelle).

Par ailleurs, bien que le bruit de fond radiologique soit considéré comme stable, l'Andra envisage, notamment du fait de l'ancienneté de certaines mesures, une nouvelle campagne de mesures avant la mise en service lors de la phase pilote pour actualiser cet état de référence.

L'IRSN constate que l'Andra a acquis un volume conséquent de données permettant l'établissement de chroniques spatiales et temporelles dans les principaux compartiments environnementaux du site de MHM, bien que l'établissement de l'état initial des sols et du vivant s'appuie sur des campagnes de mesure et des analyses relativement anciennes. L'IRSN convient que le bruit de fond radiologique est stable en MHM et note qu'une actualisation de cet état radiologique est prévue avant la mise en service lors de la phase pilote ; l'utilisation des meilleures techniques disponibles devrait ainsi permettre l'identification le cas échéant de radionucléides présents à des teneurs non mesurables il y a une vingtaine d'années (notamment grâce à une amélioration des seuils de décision) et permettra ainsi d'affiner la connaissance de l'état initial de l'environnement, **ce qui est satisfaisant.**

Enfin, l'IRSN constate qu'à ce stade, l'Andra a recherché les radionucléides susceptibles d'être les plus présents dans l'environnement (naturellement ou du fait des activités nucléaires), ce qui est suffisant pour le DDAC. L'IRSN note néanmoins que cet état initial radiologique n'intègre pas l'ensemble des radionucléides de l'inventaire prévisionnel de Cigéo. A cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'une analyse croisée des enjeux de sûreté avec les techniques analytiques existantes et les coûts afférents sera réalisée. De cette analyse découlera la stratégie de détermination de la teneur initiale de chaque radionucléide retenu pour chaque matrice environnementale, notamment lorsque les valeurs mesurées sont inférieures aux seuils de décision ou déduites d'autres matrices ou analyses. **L'IRSN considère que cette démarche est pertinente pour élaborer de manière complète l'état radiologique initial de l'environnement de Cigéo.**

L'Andra présente [95] une caractérisation de l'état chimique de la nappe des calcaires du Barrois réalisée sur la période 2014-2019 au niveau de huit piézomètres. Les résultats montrent que les eaux de la nappe sont très réactives à la pluviométrie et sensibles aux activités humaines sur le bassin versant du fait de la nature karstique du sous-sol : la turbidité de l'eau est élevée, un composé de détergents est régulièrement détecté sur quatre piézomètres et plusieurs polluants sont également détectés ponctuellement (insecticides et herbicides, permanganate de potassium, bentazone, nitrates et nitrites).

L'IRSN note que les éléments présentés sur la qualité chimique de l'environnement concernent principalement les paramètres anthropiques en lien avec les activités actuelles observées dans la région [96], avec une

²⁸ Les matrices sont des sous-compartiments tels que l'herbe, le lait, les ruisseaux etc. Au sein d'un même compartiment, certaines matrices sont plus susceptibles que d'autres d'être impactées par l'installation.

quantification partielle des polluants dans l'air et une description qualitative des polluants mesurés dans le sol et les eaux superficielles. Même si la description complète de l'environnement chimique n'est pas exigée par la réglementation applicable à Cigéo, **une quantification des substances toxiques chimiques qui seront retenues par l'Andra (cf. chapitre 3.5.2) parmi celles présentes dans l'inventaire de Cigéo mériterait d'être réalisée.**

En outre, l'IRSN rappelle que lors de l'expertise du DOS, il a été relevé que le stockage en surface des verses constituées des argilites excavées pouvait présenter un impact sur l'environnement, en particulier les eaux souterraines, notamment au vu des teneurs en sulfates, sodium et en métaux lourds observés dans les argilites. Sur ce point, l'Andra précise [45] que des études menées à partir d'argilites excavées depuis le LSMHM ont montré qu'elles ne génèrent pas d'éléments chimiques toxiques. Elle précise néanmoins que d'autres expérimentations visant à consolider les connaissances sur l'altération chimique des argilites excavées et la chimie des eaux de percolation et de ruissellement résultantes à l'échelle d'une verse sont prévues. **Aussi, l'IRSN considère que les résultats de ces expérimentations devront permettre d'affiner le programme de mesures visant à compléter l'état de référence du site.**

Au vu de l'ensemble des éléments présentés ci-dessus, l'IRSN considère que l'Andra devra, préalablement à la mise en service lors de la phase pilote, présenter les résultats de la nouvelle campagne de caractérisation de l'état initial radiologique et chimique de l'environnement qu'elle prévoit dans le secteur de MHM. Cette campagne devra :

- **compléter les connaissances acquises à ce stade afin que l'état initial intègre l'ensemble des éléments susceptibles d'être présents dans l'environnement, naturellement ou du fait d'activités humaines non liées à Cigéo ;**
- **inclure en particulier les éléments issus des verses si les recherches sur leur effet sur l'environnement en montrent la nécessité ;**
- **être réalisée dans les différents compartiments de l'environnement, à l'aide des meilleures techniques disponibles.**

Ce point fait l'objet de l'**engagement 2024-E7** de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime cet engagement satisfaisant en vue de l'obtention d'une base de données représentative de l'état initial du site. **En tout état de cause, il appartiendra à l'Andra de présenter, dans le dossier de mise en service lors de la phase pilote, les valeurs initiales à considérer pour l'ensemble des éléments de l'inventaire prévisionnel de Cigéo et ce, pour chaque matrice environnementale.**

4.2. Aléas naturels

L'IRSN évalue dans le présent chapitre les niveaux d'aléas liés à l'inondation d'origine externe et à la météorologie, retenus dans le DDAC pour le dimensionnement de l'installation Cigéo, en examinant notamment les marges par rapport au retour d'expérience des événements passés. Les éléments relatifs à la définition de l'aléa sismique en phase d'exploitation sont pour leur part examinés dans le cadre du GP2 et ceux relatifs à l'aléa sismique après fermeture le sont dans le cadre du GP3.



4.2.1. Aléa inondation externe

Installations de surface

Pour les installations de surface, l'Andra présente dans le DDAC une analyse [97] du risque d'inondation fondée sur le recensement de différentes situations (SRI) conformément au Guide n°13 de l'ASN [98]. Dans le cadre de la présente instruction, seules les données de site servant à cette analyse font l'objet d'une évaluation de la part de l'IRSN, l'évaluation globale du risque d'inondation étant analysée dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo.

Les données de site retenues par l'Andra pour l'analyse des SRI « Crues de cours d'eau », « Intumescence » et « Dégradation d'ouvrages » **n'appellent pas de remarque de l'IRSN.**

S'agissant de la SRI « Pluies locales », l'Andra avait pris l'engagement dans le cadre de l'instruction du DOS de Cigéo de vérifier la pertinence des pluies de forte intensité retenues et de présenter les scénarios permettant de s'assurer du bon dimensionnement du réseau pluvial conformément au Guide n°13 de l'ASN. Les éléments relatifs à l'évaluation de la SRI Pluies locales sont présentés dans les notes [99] et [100].

Afin de déterminer les pluies de référence à prendre en compte pour le dimensionnement des différentes portions du réseau pluvial, l'Andra a en premier lieu analysé la représentativité de quatre stations météorologiques autour du site (Saint-Dizier, Cirfontaines-en-Ornois, Laboratoire²⁹ et Houdelaincourt) en comparant les cumuls de pluie obtenus par ajustement statistique sur différentes durées et des périodes de retour allant de 2 à 50 ans. Cette analyse a montré que les hauteurs de pluies estimées aux stations de Saint-Dizier et de Cirfontaines sont cohérentes avec celles estimées au droit de la station Laboratoire, qui ne présente pas de données suffisantes pour déterminer des pluies de référence pour des périodes de retour centennales (cf. Annexe T11). Sur la base d'ajustements statistiques sur les stations de Saint-Dizier et Cirfontaines-en-Ornois, réalisés à l'aide de méthodes locales et régionales pour plusieurs durées de pluie (de 6 minutes à 48 heures), l'Andra retient les coefficients de Montana³⁰ pour des périodes de retour centennales obtenus à la station de Cirfontaines-en-Ornois, ceux-ci étant les plus pénalisants, puis définit sur cette base des pluies de projet³¹ de type « double-triangle ». Ces pluies de projet sont caractérisées par une durée totale de 4 heures et un pic de pluie intense dont la durée varie de 6 minutes à 30 minutes. L'IRSN relève que, contrairement aux études présentées au stade du DOS, l'Andra s'est appuyée sur les données de pluies mesurées sur le site pour sélectionner une station météorologique représentative. La station de Cirfontaines-en-Ornois *in fine* retenue donne ainsi des cumuls de pluie plus élevés pour l'ensemble des durées de pluie étudiées en comparaison de la station de Saint-Dizier retenue au stade du DOS. L'IRSN note également que les coefficients de Montana calculés permettent de couvrir les cumuls de hauteur de pluie issues des ajustements statistiques sur cette station. **En conclusion, l'IRSN considère que les pluies de référence retenues par l'Andra pour l'évaluation du risque d'inondation par la pluie sont satisfaisantes.** L'IRSN observe toutefois que l'Andra n'a pas évalué l'impact du changement climatique sur l'évolution des cumuls de pluie. Ce point est abordé au chapitre 4.2.2 ci-dessous.

S'agissant de la SRI « Remontée de nappe », le peu de mesures disponibles au niveau de la zone puits ne permettant pas de définir un niveau de nappe extrême, l'Andra a fait le choix de fixer, par une approche majorante, le niveau d'eau de référence au niveau du sol. **L'IRSN considère que ceci est satisfaisant.**

Pour ce qui est de la zone descenderie, l'Andra s'est engagée [2017-E-57] à l'issue de l'instruction du DOS à réévaluer le niveau de nappe extrême afin de mettre en œuvre une méthodologie conforme aux règles de l'art en regard notamment des préconisations du Guide n°13 de l'ASN (notamment vis-à-vis de la taille de l'échantillon retenu pour réaliser les ajustements statistiques). L'évaluation du risque de remontée de nappe dans la zone descenderie est présentée dans la note [101]. La méthodologie mise en œuvre pour calculer le niveau de référence de la nappe est identique à celle présentée dans le cadre du DOS et se base sur une analyse statistique des niveaux de nappe mesurés sur le piézomètre EST1012 sur la période de 1996 à 2014 qui a permis d'évaluer, après translation en amont du bâtiment EP1, un niveau centennal de 363 m NGF, soit supérieur à la cote de fondation du bâtiment EP1 (358 m NGF, cf. chapitre 4.1.2).

L'Andra a par ailleurs complété son évaluation par la simulation de remontées de nappe sous l'ensemble des bâtiments sur la base des niveaux calculés sur ce piézomètre EST1012. Au cours de l'expertise, l'Andra a toutefois indiqué que cette évaluation sera remplacée par une méthode basée sur la combinaison d'un « niveau initial » élevé et de l'effet de remontée dû à un « initiateur³² », pour répondre aux préconisations du Guide n°13 de l'ASN.

²⁹ Il s'agit de la station météorologique de l'Andra implantée dans le périmètre du LSMHM.

³⁰ Les coefficients de Montana permettent de déterminer pour un intervalle de temps compris entre 2 pas de temps (ou durées de cumul) non consécutifs la hauteur de pluie ou l'intensité maximale selon différentes durées de pluies et périodes de retour.

³¹ Une pluie de projet est un événement pluvieux fictif, statistiquement « représentatif » des observations dont il est issu. La construction d'une pluie de projet consiste à proposer une répartition dans le temps d'un cumul de pluies.

³² Événement, parmi ceux examinés pour la détermination des SRI (crue, niveau marin, pluies, dégradation d'ouvrage...), qui provoque les plus fortes remontées de la nappe phréatique.

Cette nouvelle méthode sera mise en œuvre à l'aide de la modélisation hydrogéologique des calcaires du Barrois qu'elle envisage de développer à l'échelle du secteur de MHM (cf. chapitre 4.1.1) afin notamment de conforter l'estimation des niveaux de nappe à une échelle plus étendue.

In fine, l'Andra prévoit, pour limiter les remontées de nappe au droit de la zone descendrière, la mise en place d'une paroi étanche sur toute la hauteur des calcaires du Barrois et de systèmes de drainage au droit des bâtiments enterrés. L'IRSN relève que cette paroi étanche va isoler du reste du système aquifère les eaux souterraines susceptibles de remonter sous le bâtiment EP1 et les têtes de descendrière. De ce fait, l'IRSN considère que l'utilisation envisagée par l'Andra d'un modèle hydrogéologique des calcaires du Barrois développé à l'échelle des bassins versants de l'Orge, de la Saulx et de l'Ornain n'apparaît pas adaptée pour déterminer les niveaux de nappe extrêmes à l'intérieur de la paroi étanche. Quoi qu'il en soit, l'IRSN estime que la nouvelle configuration des terrains et les dispositifs de drainage conduiront à une atténuation des remontées de nappe par rapport à celles actuellement estimées sur la base de données représentatives des calcaires fracturés du Barrois en place. **Aussi, le niveau de nappe extrême retenu à ce stade n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.** Les dispositifs prévus pour limiter les remontées de nappe sont pour leur part analysés dans le cadre du GP2.

Installations souterraines

Les installations souterraines et les LSF sont sensibles au risque d'inondation d'origine externe en cas d'infiltration des eaux d'exhaure en provenance des aquifères traversés. L'Andra prévoit ainsi la mise en œuvre de revêtements étanches de ces liaisons au niveau des calcaires du Barrois, tandis qu'au droit des calcaires de l'Oxfordien la gestion des eaux d'infiltration repose sur leur collecte et leur évacuation (pour l'ensemble des LSF à l'exception du puits VVE qui est étanche). Le débit des eaux d'exhaure de l'Oxfordien a été estimé par l'Andra à 50 m³/jour pour chacune des deux descendrières 4 ans après la fin du creusement et à 0,54 m³/h pour l'ensemble des 4 puits. De manière sécuritaire, l'Andra retient un débit d'exhaure de 1 m³/h pour les 4 puits, soit 6 m³/jour pour chacun des puits.

S'agissant de la traversée des calcaires du Barrois, l'IRSN estimait dans le cadre de l'expertise du DOS qu'ils constituent la seule source susceptible de mobiliser des volumes d'eau et des débits importants du fait des circulations karstiques observées dans ces formations. Dès lors, l'IRSN rappelle l'importance évoquée *supra* (cf. chapitres 4.1.1 et 4.1.2) de la caractérisation des zones d'écoulement au sein de cet aquifère et de la définition des besoins de traitement de terrain à réaliser, ainsi que du bon dimensionnement de l'étanchéité du revêtement des LSF prévu par l'Andra à cet effet. Ce dimensionnement est évalué par l'IRSN dans le cadre du GP2.

S'agissant de la traversée de l'Oxfordien, la modélisation mise en œuvre par l'Andra pour estimer les débits attendus au niveau des descendrières **n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.** Pour ce qui concerne l'estimation des débits au droit des puits, l'IRSN note que les débits d'exhaure estimés pour Cigéo sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés au droit du puits principal du LSMHM, **ce qui n'appelle pas non plus de remarque.** Il appartient néanmoins à l'Andra d'étudier, au titre de la Loi sur l'eau, l'impact environnemental potentiellement engendré dans l'Oxfordien par le cône de rabattement qui résultera du drainage de cet aquifère. Les dispositifs retenus par l'Andra pour gérer les eaux d'exhaure provenant des différentes formations traversées sont analysés dans le cadre du GP2.

4.2.2. Aléas météorologiques

A l'issue de l'instruction du DOS de Cigéo, l'Andra a pris l'engagement 2017-E-60 visant à justifier les aléas météorologiques retenus pour le dimensionnement des installations de surface. Les éléments relatifs à la prise en compte des aléas météorologiques pour le dimensionnement de l'installation sont décrits dans [102]. L'Andra présente ainsi les risques liés aux températures extrêmes maximales et minimales, aux chutes de neige, aux vents forts et à la tornade, en justifiant les marges retenues.

Démarche vis-à-vis du changement climatique

L'IRSN considère que compte tenu de la durée envisagée d'exploitation de l'installation (environ 150 ans), les aléas météorologiques pris en compte seront impactés par le changement climatique ou sont susceptibles de l'être. Or l'Andra ne présente pas la stratégie envisagée pour tenir compte de l'évolution des connaissances scientifiques sur le changement climatique et *in fine* définir les niveaux d'aléas à prendre en compte en considérant la durée d'exploitation de l'installation.

Au cours de la présente instruction, l'Andra a indiqué que des analyses complémentaires pourront être menées pour tenir compte des évolutions des connaissances et notamment pour analyser l'impact d'une augmentation de niveaux d'aléas extrêmes sur la démonstration de sûreté ainsi que sur la conception de l'INB. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que des dispositions techniques et organisationnelles compensatoires pourront être retenues afin de faciliter des modifications ultérieures du dimensionnement des structures et/ou équipements. Enfin, l'Andra rappelle que le processus de réexamen de sûreté permettra de réévaluer les niveaux d'aléas météorologiques.

L'IRSN observe que les éléments présentés à ce stade pour tenir compte des effets potentiels du changement climatique restent très génériques, à l'exception de l'évaluation de la température extrême, et que l'Andra ne présente pas de niveaux d'aléas représentatifs de la situation potentielle du climat à la fin de la durée d'exploitation de l'installation. Par ailleurs, en dehors du cadre de réexamen de sûreté classique, aucune démarche n'est détaillée ni formalisée concernant le suivi de l'évolution des connaissances vis-à-vis du changement climatique. Enfin, l'Andra n'a pas présenté d'éléments relatifs à la capacité d'adaptation de l'installation face à des niveaux d'aléas susceptibles d'évoluer avec le changement climatique (marges dans le dimensionnement, moyens mobiles, organisation de l'exploitation...). Aussi, **afin de tenir compte de l'impact du changement climatique tout au long de la durée d'exploitation de Cigéo, l'IRSN considère que l'Andra devra, préalablement à la mise en service lors de la phase pilote :**

- **définir des niveaux d'aléas hydro-météorologiques représentatifs de situations climatiques envisageables à la fin de la durée d'exploitation ;**
- **présenter une démarche détaillée concernant le suivi de l'évolution des connaissances sur le changement climatique et son impact sur les niveaux d'aléas retenus pour l'installation ;**
- **présenter des éléments relatifs à la capacité d'adaptation de l'installation afin d'assurer une protection face à des niveaux d'aléas susceptibles d'évoluer avec le changement climatique.**

Ces points font l'objet de l'**engagement 2024-E8** de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Températures

Dans le DDAC [102], l'Andra indique que les températures extrêmes peuvent avoir un impact sur l'intégrité des structures abritant des substances radioactives et peuvent provoquer la perte de fonctionnement des équipements nécessaires à la maîtrise de la sûreté de l'installation. Les plages de température extrêmes suivantes ont été prises en compte :

- -20°C et +42°C sur une durée de 7 jours ;
- -25°C et +47°C sur une durée de 12 heures.

Les températures chaudes correspondent respectivement aux températures maximales extrapolées en contexte stationnaire³³ sur des périodes de retour de 50 ans (température appliquée sur 7 jours) et 100 ans (température appliquée sur 12 heures), à partir des températures instantanées (non moyennées sur une période donnée) relevées à la station météorologique de Saint-Dizier. Pour la température retenue sur 12 heures, l'Andra tient compte d'une marge de 2°C afin d'intégrer les effets éventuels du changement climatique. Les températures froides correspondent quant à elles aux températures minimales extrapolées sur des périodes de retour de 20 ans (7 jours) et 100 ans (12 heures) à partir des températures instantanées relevées à cette même station.

³³ En contexte stationnaire les caractéristiques statistiques des séries de données (moyenne, variance, ...) sont supposées invariables dans le temps, à l'inverse du contexte instationnaire qui permet notamment de tenir compte de l'effet du changement climatique sur ces caractéristiques.

Par ailleurs, comme indiqué *supra*, l'Andra a précisé au cours de l'expertise que des analyses complémentaires pourront être menées pour tenir compte des évolutions des connaissances sur le changement climatique. Ces analyses pourront permettre d'évaluer des niveaux de températures extrêmes à l'horizon 2100 et d'analyser l'impact, le cas échéant, de ces températures sur la démonstration de sûreté. L'Andra rappelle également qu'un groupe de travail pluraliste sous l'égide de l'ASN sur les températures sera prochainement lancé.

Les températures froides extrêmes retenues par l'Andra **n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN**. Pour les températures chaudes, l'IRSN note que l'Andra utilise des données de températures instantanées pour définir des températures moyennes sur 7 jours et 12 heures, ce qui apporte un conservatisme. Cependant les périodes de retour retenues (50 et 100 ans) ne correspondent pas à des périodes de retour très rares. Sur ce point, l'IRSN rappelle que les discussions au sein du groupe de travail « Agressions externes » dont les travaux se sont finalisés en 2021 [103] ont conduit l'IRSN, l'ASN et les exploitants à « s'accorder sur l'intérêt d'une cible commune pour les installations nucléaires nouvelles en cohérence avec ce que préconisent WENRA et le Guide n° 22 de l'ASN élaboré conjointement avec l'IRSN pour les réacteurs électronucléaires, à savoir caractériser les aléas avec des niveaux « de référence » associables à une fréquence annuelle de dépassement inférieure à $10^{-4}/\text{an}$ ». Une approche courante pour atteindre cet objectif consiste à calculer des aléas pour des périodes de retour cinquantennales à centennales et à majorer les valeurs obtenues, ce qui pourrait être mis en œuvre pour Cigéo même si sa durée d'exploitation est supérieure à celle des installations nucléaires classiques.

Pour ce qui concerne les données utilisées, l'IRSN relève que l'Andra n'a effectué des calculs qu'à l'aide d'une méthode locale tenant compte des relevés de températures sur une station unique (Saint-Dizier) et n'a pas comparé ces résultats avec des modèles régionaux permettant de tenir compte des tendances climatiques régionales. L'IRSN note cependant que la validité de ces valeurs a été vérifiée en les comparant aux valeurs obtenues à la station de Cirfontaines située à proximité du site, celles-ci étant inférieures de plus de $1,5^{\circ}\text{C}$ à celles obtenues à Saint-Dizier.

L'IRSN note par ailleurs que les calculs ont été réalisés en contexte stationnaire, ce qui ne permet pas de tenir compte de l'impact du changement climatique. L'IRSN a réalisé des calculs pour estimer les valeurs de températures obtenues en 2045³⁴ pour des périodes de retour centennales en contexte instationnaire sur des stations autour du site, dont les stations de Saint-Dizier et Cirfontaines (cf. Annexe T12). Il en résulte notamment que pour Saint-Dizier, la température obtenue en contexte instationnaire en 2045 atteint $46,1^{\circ}\text{C}$. Ainsi, la valeur de température de 47°C retenue sur 12 heures ne présente qu'une marge faible pour couvrir une température associée à une fréquence de dépassement de $10^{-4}/\text{an}$ à court terme. Par ailleurs, il est à noter que diverses projections climatiques sont disponibles pour le territoire français au-delà de 2050 et qu'au niveau national, une trajectoire de réchauffement climatique de référence (TRACC³⁵) est envisagée jusqu'en 2100. Ainsi, en complément des éléments attendus concernant la capacité d'adaptation de l'installation sur l'ensemble de la durée d'exploitation, l'IRSN considère que l'Andra doit réévaluer la valeur de température maximale retenue pour le dimensionnement de Cigéo afin de tenir compte d'une fréquence de dépassement de $10^{-4}/\text{an}$ et de l'état des connaissances actuellement disponible sur l'impact du changement climatique. **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, préalablement à la mise en service lors de la phase pilote, justifier la suffisance des températures retenues pour sa démonstration de sûreté en regard de températures associées à une fréquence de dépassement cible de $10^{-4}/\text{an}$ et estimées à l'aide de données récentes, en tenant compte de l'impact du changement climatique au travers de scénarios pénalisants de projection climatique, pour un horizon temporel cohérent avec la durée d'exploitation de l'installation.** Ce point fait également l'objet de l'**engagement 2024-E8** de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Aléa Neige

³⁴ Cette date de 2045 a été retenue par l'IRSN pour illustrer l'impact du changement climatique à relativement court terme. Il est à noter que dans l'approche mise en œuvre par l'IRSN, la température d'une période de retour donnée varie avec l'année d'intérêt retenue.

³⁵ [La trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique \(TRACC\) | Ministères Écologie Énergie Territoires \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr)

L'Andra retient une charge de neige caractéristique de 45 daN.m⁻² conformément à l'Eurocode NF EN 1991-1-4 et retient en complément une charge de neige exceptionnelle de 90 daN.m⁻². Une hauteur de neige de 90 cm est par ailleurs retenue pour l'analyse du risque d'obstruction des prises d'air. L'Andra indique enfin que le cumul de neige maximal sur 24 heures observé de 2007 à 2016 à Saint-Dizier est de 7 cm.

A cet égard, un GT intitulé « Vent et Neige » a émis en 2023, soit postérieurement au dépôt par l'Andra du DDAC, de nouvelles préconisations visant à définir, pour l'analyse de la robustesse des nouvelles installations nucléaires, des niveaux d'aléas cohérents avec les objectifs de sûreté pour ces installations [104]. Ce groupe de travail préconise notamment de définir une charge de neige au sol cinquantennale (valeur caractéristique de l'Eurocode ou établie à partir d'une étude statistique), pondérée par un facteur de majoration multiplicatif afin de définir une charge de neige visant une période de retour décennale. Les valeurs de majorations proposées par le groupe de travail sont comprises entre 2 et 4 et feront l'objet d'un arbitrage lors de la phase d'élaboration d'un guide de l'ASN à venir sur le sujet. Ainsi, l'IRSN observe qu'en appliquant un facteur 2 à la charge caractéristique de l'Eurocode, la valeur de charge de neige exceptionnelle retenue par l'Andra se situe dans la gamme inférieure des valeurs discutées dans le cadre du GT.

Vis-à-vis du retour d'expérience des cumuls de neige à proximité du site, l'IRSN relève que l'analyse de l'Andra repose sur une période courte (9 ans), alors que le groupe de travail recommande de mener des études approfondies sur les niveaux de neige historiques ayant pu être observés autour du site (le rapport du GT cite notamment des records remontant jusqu'à l'année 1946). Par ailleurs l'IRSN relève que le cumul de neige maximal mesuré sur cette période de 9 ans est relativement faible vis-à-vis de records de neige observés sur les stations Météo-France à l'échelle nationale (cf. Annexe T12). **Aussi, afin de compléter l'évaluation des risques liés à la neige, l'IRSN estime que l'Andra devra, préalablement à la mise en service lors de la phase pilote, réaliser une étude approfondie des niveaux de neige historiques ayant pu être observés dans un rayon représentatif des conditions du site.** Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E9](#) de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

Par ailleurs, l'IRSN rappelle que des préconisations générales ont été formulées par le GT précité concernant l'analyse des risques liés à la neige, notamment le risque d'obstruction des prises d'air des grilles de ventilation ou l'isolement du site. **Ainsi, il appartiendra à l'Andra de mener une analyse de robustesse de l'installation en regard de ces préconisations du GT « Vent et Neige », notamment en analysant l'impact de la prise en compte d'un niveau de neige couvrant la gamme de valeurs de majorations préconisées par ce GT.** Ceci est analysé dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation de Cigéo.

Aléa Vent

Dans le DDAC [102], l'Andra présente une estimation des vitesses de vent pour une période de retour centennale à la station de Saint-Dizier, en retenant la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95%. Les valeurs obtenues sont respectivement de 112 km/h (environ 31 m/s) pour le vent moyen et 194 km/h (environ 53,8 m/s) pour les rafales. L'Andra a également indiqué que la rafale maximale enregistrée à Saint-Dizier sur la période de mesures est de 160 km/h le 26 décembre 1999. Enfin, l'Andra a précisé au cours de l'expertise, que les estimations de vitesses de vent ont été réalisées par Météo France pour 3 stations météorologiques locales (Saint-Dizier, Erneville et Blécourt).

L'IRSN considère que, comme pour l'aléa neige, l'analyse de robustesse de l'installation nécessiterait de prendre en compte les nouvelles préconisations du GT « Vent et Neige » visant à définir des niveaux d'aléas cohérents avec des objectifs de sûreté pour les nouvelles installations nucléaires [104]. L'IRSN rappelle à cet égard que ce groupe de travail préconise de définir un aléa de vent à partir d'un vent moyen cinquantennal représentatif des conditions de références définies dans l'Eurocode et pondéré par un facteur de majoration multiplicatif, afin de définir un aléa de vent visant une période de retour décennale. Différentes valeurs de majorations ont été discutées au sein du groupe de travail et sont comprises entre 1,3 et 1,5 ; elles feront aussi l'objet d'un arbitrage lors de la phase d'élaboration du futur guide de l'ASN. L'IRSN note que la vitesse du vent de rafale

retenue par l'Andra couvre la vitesse de pointe associée à une application des préconisations du GT « Vent et Neige » en considérant la majoration la plus pénalisante dans la gamme envisagée par le groupe de travail³⁶. L'IRSN note par ailleurs que cette valeur retenue par l'Andra est également supérieure aux valeurs de vent estimées sur la station de Saint-Dizier dans le cadre des études réalisées en appui au groupe de travail³⁷, comprises entre 26,1 et 34,3 m/s. Elle couvre également le retour d'expérience régional. **Ces éléments sont satisfaisants.**

L'IRSN rappelle toutefois que d'autres préconisations plus générales ont été formulées par le GT pour l'analyse des risques liés au vent, notamment concernant les projectiles à retenir. A cet égard, il importe que l'Andra mène une analyse de robustesse de l'installation en regard de l'ensemble des préconisations du GT « Vent et Neige ». Ceci est analysé dans le cadre du GP2.

Aléa Tornado

Dans le DDAC, l'Andra retient comme tornade de dimensionnement une tornade d'intensité EF2, caractérisée par :

- une vitesse maximale de vent V_m de 55 m/s (198 km/h) ;
- une variation de pression atmosphérique Δp de $\pm 2,40$ kPa ;
- une vitesse de chute de pression de 0,6 KPa/s ;
- une prise en compte des projectiles de type « bille en acier » et « planche de bois » comme pouvant être engendrés par ce type de tornade.

Par ailleurs, l'Andra retient une tornade d'intensité EF3 pour les « SSC Noyau Dur », à savoir le génie civil des zones tampons des colis primaires et colis de stockage au sein du bâtiment nucléaire de surface EP1, le génie civil du puits VVE et, pour le bâtiment qui lui est associé, les équipements associés à la fonction ventilation extraction. Cette tornade est caractérisée par :

- une vitesse maximale de vent V_m de 65 m/s (234 km/h) ;
- une variation de pression atmosphérique Δp de $\pm 3,30$ kPa ;
- une vitesse de chute de pression de 1 KPa/s ;
- une prise en compte des projectiles de type « voiture », « tube en acier » et « sphère métallique » comme pouvant être engendrés par cette tornade.

L'IRSN relève que les caractéristiques associées à une tornade EF2 sont cohérentes avec le courrier CODEP-DRC-2021-017735 de l'ASN émis dans le cadre de la prise en compte des risques d'agression liés aux tornades pour le dimensionnement des INB [105]. La variation de pression et la vitesse de chute de pression sont en particulier calculées selon les recommandations de la réglementation américaine RG 1.76 [106], **ce qui est satisfaisant.**

Pour ce qui concerne la tornade EF3, l'IRSN note que la vitesse maximale de vent retenue par l'Andra et les caractéristiques du projectile « sphère métallique » sont légèrement inférieures à celles de 68 m/s définies dans le courrier de l'ASN précité [105]. **De manière formelle, il appartiendra à l'Andra de tenir compte dans le cadre de la protection des « SSC Noyau Dur » d'une tornade EF3 caractérisée par une vitesse de vent de 68 m/s, ainsi que par une variation de pression atmosphérique et une vitesse de chute de pression associée à cette vitesse de vent, et des projectiles conformes au courrier de l'ASN³⁸.**

³⁶ Estimation de la vitesse de pointe réalisée à partir du vent de référence défini selon l'Eurocode NF EN 1991-1-4, pour la région 2, pour une classe de rugosité IIIa et une hauteur z de 10 m et en considérant une valeur de majoration de 1,5.

³⁷ Dans le cadre du GT « Vent et Neige » des calculs ont été réalisés sur une centaine de stations météorologiques, dont la station de Saint-Dizier, en utilisant les méthodes de la théorie des valeurs extrêmes. Les valeurs de vent obtenues sur la station de Saint-Dizier varient entre 26,1 et 34,3 m/s pour des périodes de retour centennales avec un intervalle de confiance à 95%.

³⁸ un projectile de type « bille d'acier » de 2,5 cm de diamètre et 70 g, un projectile de type « tube d'acier » de diamètre 0,17 m, de longueur 4,6 m et de 130 kg et un projectile de type « automobile » de dimensions 4,5 m x 1,7 m x 1,5 m et de 1180 kg.

5. LE SOUS-SOL DU SITE DE MEUSE/Haute-MARNE



5.1. Géologie du site : incertitudes résiduelles et reconnaissances à venir

La connaissance de la géologie du site fait l'objet de recherches approfondies par l'Andra depuis les années 1990, dont celle de la couche du COX par des expérimentations *in situ* dans le LSMHM depuis 2004, qui a été régulièrement examinée par l'IRSN (cf. Annexe T1 de [30]). La nature et la configuration générale des couches géologiques du site, dont les grands traits sont décrits au chapitre 2.1 du présent rapport, sont donc désormais bien connues. L'acquisition par l'Andra de nouvelles connaissances sur le sous-sol depuis l'élaboration du DOS a consisté en de nouveaux traitements et interprétations des données géophysiques déjà disponibles et à 3 nouvelles campagnes de sismique-réfraction réalisées en vue des futurs terrassements sur la zone puits et sur la zone de descenderie. Deux phases d'acquisition de connaissances restent encore prévues par l'Andra : la campagne **ZBS** (« ZIOS Borehole Survey »), qui n'a pu être réalisée en amont du DDAC en raison de l'occupation du bois Lejuc (cf. chapitre 4.1.1) et dont le démarrage est prévu en 2026, ainsi que les reconnaissances à l'avancement du creusement de Cigéo, comprenant des mesures « en avant du front de taille » et « au cours du creusement ».

Les connaissances relatives au contexte tectonique (état de contraintes) et au contexte structural des couches géologiques (notamment leur géométrie) sont essentielles au niveau de la ZIOS, en particulier pour s'assurer de l'absence de failles pouvant remettre en cause les caractéristiques de confinement favorables de la roche hôte, pour comprendre son comportement hydro-mécanique, pour développer le modèle hydrogéologique ainsi que pour évaluer l'aléa sismique au niveau du site, examinés respectivement aux chapitres 6.3.1, 5.4.1 et 5.1.3. Le présent chapitre porte ainsi sur l'évolution des connaissances relatives aux contextes tectonique et structural, sur les ressources naturelles du sous-sol, sur la géodynamique passée et l'évolution géoprospective puis sur l'hydrogéologie du secteur de MHM.

5.1.1. Contexte tectonique du site

Le champ de contraintes tectoniques est à l'origine des déformations observées à l'échelle du site géologique, en particulier via l'activité sismique. Il doit donc être connu pour évaluer l'aléa sismique actuel et son évolution à long terme, mais également pour comprendre et modéliser le comportement de la roche hôte lors de son creusement, puis en phase d'exploitation sous diverses sollicitations (notamment thermique) et après remblayage des ouvrages.

Les mesures et observations réalisées par l'Andra, qui ne présentent pas d'évolution depuis le DOS, lui ont permis de déterminer le tenseur complet des contraintes naturelles avec une direction principale orientée autour de N155°, cohérente avec l'histoire géologique du site liée à la compression alpine, légèrement déviée localement, notamment à l'interface avec les calcaires de l'Oxfordien sus-jacent. L'IRSN souligne que cette mesure de perturbation du champ de contrainte à l'interface entre ces deux formations à propriétés mécaniques contrastées confirme la possibilité d'un point singulier en cas de séisme. Les scellements de LSF étant prévus d'être mise en place à proximité de cette interface, l'IRSN examinera les conséquences potentielles d'un séisme sur ces ouvrages dans le cadre du GP3 relatif à la sûreté après fermeture.

Ce tenseur fait apparaître une anisotropie des contraintes horizontales majeure (σ_H) et mineure (σ_h) dans le COX :

- la contrainte horizontale majeure, autour de 14 MPa (σ_H entre 13 et 16 MPa), est cohérente avec les contraintes mesurées dans les encaissants calcaires,
- la contrainte horizontale mineure, autour de 12 MPa mais variable (σ_h entre 8 et 14,7 MPa), est supérieure à celles mesurées dans les encaissants calcaires, notamment au milieu de la couche du COX.

La contrainte verticale correspond au poids des terrains ; elle croît donc avec la profondeur et se situe autour de 12 MPa. Au stade du DDAC, l'Andra explique l'anisotropie des contraintes horizontales par une rémanence d'une

déformation par pression-dissolution dans les encaissants calcaires le long des failles du secteur sur des durées géologiques, tout en mentionnant que le fluage des argilites aurait dû permettre une dissipation de cette anisotropie. En outre, l'Andra indique qu'en l'absence de microsismicité et de déformations horizontales dans le Bassin parisien (résultat issu de mesures GPS [107][108]), il n'existe pas actuellement de mécanisme tectonique pouvant générer une déformation horizontale à grande échelle dans cette zone.

L'IRSN convient que l'anisotropie des contraintes dans le COX pourrait être partiellement expliquée par un phénomène de pression-dissolution dans les encaissants calcaires (e.g. [110][111]), mais estime que le fluage des argilites pourrait être trop lent pour compenser le différentiel de contraintes imposées en continu par la tectonique (compression alpine) sur la couche du COX, comme sur toute la pile sédimentaire. En outre, l'IRSN estime que même si les mesures GPS ne révèlent pas de déformation, il n'est pas possible à ce stade d'exclure l'existence d'une déformation de dimension proche de la limite de résolution (e.g. [109]). Par conséquent, l'IRSN considère que l'anisotropie des contraintes dans le COX est la marque d'une activité tectonique extrêmement faible mais active dans le secteur de MHM.

L'IRSN constate par ailleurs que la variabilité des contraintes dans le COX, notamment de la valeur de σ_h , n'est pas pleinement comprise à ce stade. L'incertitude associée fait l'objet d'une analyse par l'IRSN dans les chapitres 6.2.3 et 6.3.1 du présent rapport relatifs respectivement à la tenue de la roche aux pressions de gaz à long terme et à son évolution géomécanique lors du creusement.



5.1.2. Contexte structural du site

La connaissance du schéma structural du secteur de MHM par l'Andra, qui inclut les plis, les flexures et les failles associées, y compris les dimensions de ces dernières en profondeur, a notablement progressé depuis le début du développement du projet Cigéo. Elle permet de préciser la géométrie des couches et de représenter explicitement les failles et leur rôle hydraulique dans le modèle hydrogéologique (cf. chapitre 5.4). La connaissance des failles est également nécessaire pour évaluer le spectre d'aléa sismique après fermeture du stockage³⁹. L'IRSN analyse successivement ci-dessous les améliorations apportées par l'Andra sur la connaissance de la zone de failles située au sud de la ZIOS (ZFD) et celle du schéma structural au sein de la ZIOS elle-même.

5.1.2.1. Schéma structural de la zone de fracturation diffuse au sud du site

L'Andra a procédé en 2022 au retraitement et à l'interprétation de l'ensemble des lignes de sismique-réflexion pétrolières 2D disponibles sur la ZFD (cf. sud du site sur la Figure 1). Le schéma structural de la ZFD ainsi actualisé, constitué essentiellement d'un réseau de failles orientées N140° et N155° entre les zones de failles orientées N030° de Joinville et Gondrecourt, est présenté en Annexe T13. D'autres failles orientées N140-N155° sont identifiées à l'est du fossé de Gondrecourt, mais parmi les failles de la ZFD, seule la faille de Brouthières traverse le fossé.

L'IRSN considère que le schéma structural qui résulte de ces travaux apparaît, en comparaison des éléments présentés au stade du DOS, plus cohérent avec les connaissances de l'histoire structurale de la zone. L'IRSN observe cependant certaines incohérences entre la longueur des failles cartographiées de la ZFD et leur rejet vis-à-vis des lois d'échelle classiques entre longueur, largeur et rejet des failles. Par exemple, la faille de Bressoncourt (voir Figure 1) présente une longueur cartographiée de 1,5 km, ce qui apparaît sous-estimé par rapport à son rejet vertical d'une cinquantaine de mètres à la base du Trias [113].

A l'inverse, la longueur totale cartographiée de plusieurs dizaines de kilomètres des failles de Gondrecourt pourrait suggérer une profondeur atteignant le socle. A cet égard, l'IRSN avait déjà émis la possibilité en 2005 [9], sur la base d'observations sismiques, d'un enracinement profond des portions nord et sud de Gondrecourt (respectivement vers Void-Vacon et le fossé de Roches-Bettaincourt). En outre, contrairement à ce qu'elle

³⁹Le spectre SMPP est examiné dans le cadre du GP3 relatif à l'évaluation de sûreté après fermeture. A noter que l'aléa sismique pour la période d'exploitation, qui se base sur les catalogues de séismes historiques et de mesures de sismicité instrumentale, est examiné dans le cadre du GP2 relatif à la sûreté en exploitation.

considérerait jusqu'alors, l'Andra indique que la structure des failles orientées N030° est liée à une phase de formation antérieure à l'Oligocène pour au moins une partie d'entre elles, probablement un des épisodes liés à la formation des Pyrénées. L'Andra a réalisé une datation sur la calcite des miroirs de failles de Gondrecourt au niveau des affleurements, permettant d'identifier deux épisodes de cristallisation à l'Eocène moyen et terminal [114][115], qui correspondraient à la phase majeure de compression pyrénéenne et celle de décrochement extensif qui s'est poursuivie à l'Oligocène. L'IRSN, ainsi que mentionné notamment dans le cadre de l'examen du Dossier 2005 [9], estime en effet qu'une origine tectonique « pyrénéenne » pourrait expliquer à la fois les variations de profondeur (localement jusqu'au socle) et un possible compartimentage du réseau de failles de Gondrecourt.

Les conséquences de l'évolution de ce schéma structural, par rapport à celui présenté au stade du DOS, sur le rôle hydraulique attribué aux failles dans le modèle hydrogéologique et sur le spectre d'aléa sismique après fermeture sont examinées respectivement aux chapitres 5.4 et 5.1.3 ci-après.

5.1.2.2. Schéma structural à l'aplomb du Laboratoire et de la ZIOS

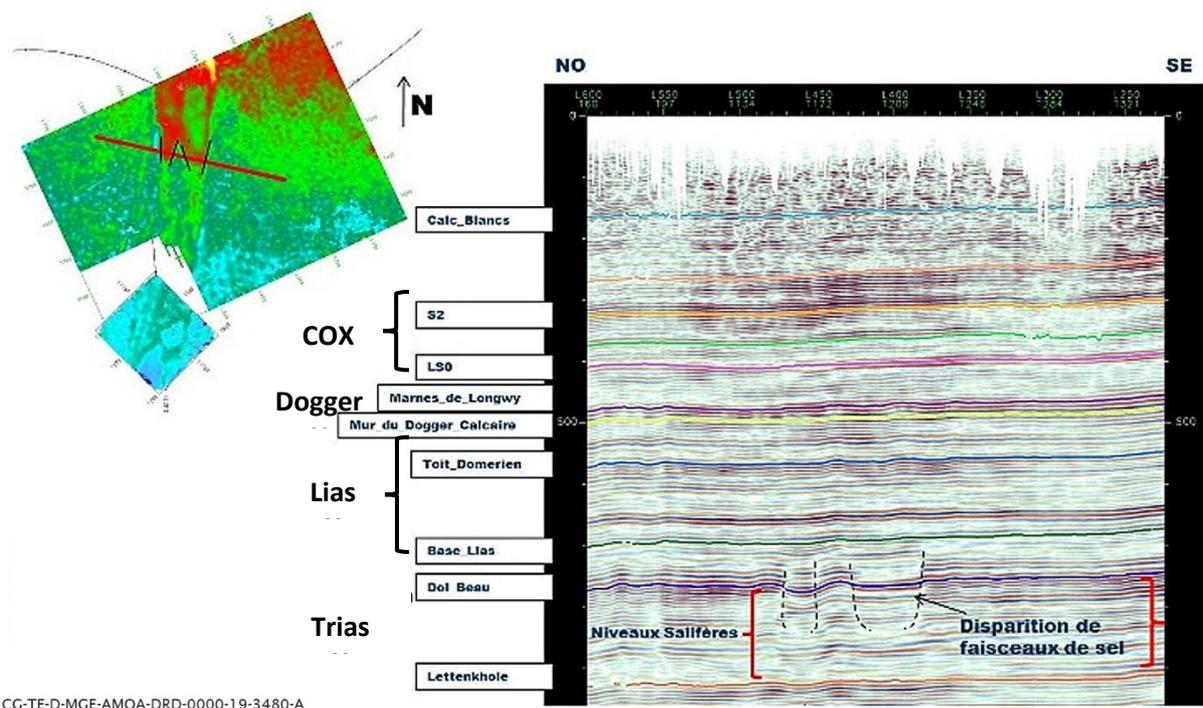
Les campagnes de reconnaissance du sous-sol par sismique-réflexion 3D conduites en 1999 autour du LSMHM, puis en 2010 sur l'emprise de la ZIOS, avaient conduit à l'identification d'anomalies orientées approximativement N120° interprétées comme des corps récifaux au sommet du Bajocien inférieur ainsi qu'à des anomalies orientées autour de nord-sud au nord de la ZIOS, nettes dans le Trias et dans la base du Lias et suspectées dans les couches géologiques au-dessus. A cet égard, l'Andra s'était engagée (2013-E-3.3), à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 » [19] (cf. chapitre 1.2), à consolider l'interprétation de ces indices sismiques afin de préciser le modèle conceptuel du milieu géologique du site de MHM, à développer une stratégie de reconnaissance des caractéristiques structurales du COX (notamment à l'avancement du creusement) et d'implantation des ouvrages de stockage, et enfin à retenir un scénario permettant d'estimer l'impact d'une ou plusieurs structures tectoniques dans le COX.

S'agissant des structures orientées N120°, l'Andra indique dans le DDAC, sur la base d'observations de terrain, que les calcaires récifaux du Bajocien sont quasiment entièrement cristallisés donc non transmissifs, ce qu'elle explique par les phénomènes intenses de diagenèse qu'ils ont subis après leur formation [116]. Concernant le prolongement en profondeur de ces anomalies sous le Bajocien sur les deux blocs de sismique 3D (1999 et 2010), l'Andra les attribuait en 2012 [19] à des anomalies liées aux vitesses sismiques plus rapides au sein des récifs. L'Andra indique, après avoir procédé à un retraitement en 2018 de la sismique 3D de la ZIOS [117], que ces anomalies restent cependant visibles [118]. L'IRSN estime sur cette base qu'il ne peut être exclu que celles-ci correspondent à des failles mineures affectant les terrains sous-jacents au Bajocien inférieur, mais que l'observation d'une recristallisation des corps récifaux du Bajocien est en faveur d'une absence de circulation préférentielle des eaux souterraines dans l'axe de ces structures. L'IRSN estime enfin, étant donné que le principal horizon producteur du Dogger se situe au niveau du Bathonien supérieur (cf. chapitre 5.4.1), soit bien au-dessus du Bajocien inférieur, qu'une éventuelle fracturation drainante associée à cette anomalie le cas échéant ne modifierait pas les trajectoires et vitesses de radionucléides entre le COX et les exutoires du Dogger. **Aussi, ces structures N120° peuvent être considérées comme sans impact sur la sûreté de Cigéo.**

S'agissant des structures nord-sud dans le Trias au Nord de la ZIOS et des anomalies sus-jacentes, outre l'engagement précité (2013-E-3.3), l'Andra s'était également engagée à l'issue de l'instruction du DOS (2017-E-08) à présenter dans le DDAC les premiers résultats d'« *une reconnaissance directe du Callovo-Oxfordien [...] réalisée à l'aplomb de la zone suspectée affaissée dans le Nord de la ZIRA [afin] de lever tout doute sur sa profondeur réelle ainsi que sur le caractère intact de la roche dans les zones présumées flexurées* ».

Afin de consolider son interprétation sismique, l'Andra a développé pour le DDAC un nouveau modèle géologique de « proche surface » [119] visant à corriger la sismique 3D de 2010 de l'effet de la topographie et des variations de vitesses superficielles. Ce modèle s'appuie sur des données acquises par une cinquantaine de forages VT (« Vertical de Temps ») et de campagnes de sismique-réfraction permettant de mesurer les vitesses des ondes sismiques et d'imager leurs variations dans les couches superficielles. L'Andra conclut, à l'issue de ce

retraitement, à l'absence d'anomalie au sein du COX dans le nord de la ZIOS, et plus généralement au-dessus des Marnes de Longwy (Dogger ; cf. Figure 2). L'IRSN confirme qu'il n'est plus clairement identifié de « zone affaissée » au niveau du COX sur la sismique 3D, mais constate pour sa part, ainsi qu'illustré sur la Figure 21, qu'à l'issue du travail de retraitement sismique réalisé par l'Andra, des anomalies restent visibles au-dessus des structures du Trias au moins jusqu'au sommet du Lias. Or, l'IRSN rappelle que les analyses issues des méthodes sismiques⁴⁰ ne permettent pas de conclure définitivement à l'absence de structure dans la roche hôte et doivent être corroborées par une reconnaissance directe à l'aplomb des structures ciblées, ce qui avait donné lieu à l'engagement 2017-E-08 précité. L'IRSN souligne en outre que, si les vallées de la Bureau et de l'Ormançon (Figure 1) peuvent être à l'origine d'altérations en surface et donc de vitesses sismiques singulières nécessitant des corrections sur le bloc sismique, l'orientation nord-sud de ces vallées peut également être un indice de présence de structures tectoniques ayant guidé les cours d'eau. **L'IRSN estime donc qu'il subsiste une incertitude sur la couche géologique jusqu'à laquelle ces structures nord-sud se sont propagées. De plus, ainsi qu'indiqué dans à l'issue de l'examen du dossier « Etudes remises depuis 2009 » [19], ces structures tectoniques profondes, même si elles ne se sont pas propagées de manière franche au-dessus du Lias, pourraient se matérialiser dans le COX par une déformation des couches (flexures) et/ou un endommagement de la roche et, le cas échéant, pourrait nécessiter dans les deux cas d'adapter l'architecture de l'installation souterraine de stockage.**



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-19-3480-A

Figure 21. Coupe est-ouest réalisée dans le bloc de sismique 3D de 2010. Les horizons repères ont été surlignés par différentes couleurs par l'Andra et les ruptures nettes dans la continuité de ces horizons ont été marquées par des traits pointillés ([81], modifié)

S'agissant de la reconnaissance directe du COX à l'aplomb de ces structures, l'IRSN relève que celle-ci n'a pas pu avoir lieu faute de mise en œuvre du programme ZBS, dont les résultats sont dorénavant reportés à l'horizon 2028 (voir chapitre 5.1 ci-dessus). En outre, l'IRSN constate que les lignes sismiques et les forages prévus dans ce programme ne recoupent pas les structures nord-sud les plus marquées du nord de la ZIOS (profil de la plateforme nord orienté nord-sud, parallèle à ces structures) [120]. Par ailleurs, s'agissant des orientations transmises par l'Andra au cours de l'instruction en matière de reconnaissance à l'avancement du creusement

⁴⁰ La résolution de la sismique 3D mise en œuvre par l'Andra nécessite qu'une faille décale des couches verticalement (« rejet vertical ») de plus de quelques mètres. Les failles « mineures » (faible rejet) ou ayant un rejet essentiellement horizontal (failles « décrochantes ») sont donc difficilement détectables.

[46], l'IRSN rappelle, ainsi qu'indiqué au chapitre 5.1.4 du présent rapport, que l'Andra n'envisage pas de réaliser d'avant-forage avant le creusement d'ouvrages horizontaux dans la zone souterraine de Cigéo et que la possibilité d'une reconnaissance du COX en avant du front de taille n'est pas démontrée avec l'usage prévu d'un tunnelier pleine face. Ainsi, aucune des deux campagnes de reconnaissance prévues avant la demande de mise en service lors de la phase pilote ne permettra de lever le doute sur le caractère sain du COX à l'aplomb de ces structures, situées au niveau du quartier de stockage HA. **Aussi, il apparaît nécessaire que l'Andra établisse et mette en œuvre un programme dédié à la reconnaissance spécifique du COX à l'aplomb des structures identifiées au Trias, afin que les résultats de ce programme soient disponibles en vue du bilan de la phase pilote et en tout état de cause avant le creusement des galeries de liaison qui desserviront le quartier de stockage HA. Ce point fait l'objet de la recommandation ci-dessous.** L'IRSN estime que la mise en œuvre d'au moins une des deux campagnes de reconnaissance prévues au cours de la phase de construction initiale (campagne ZBS [120] ou reconnaissance de la zone de stockage prévue au début de la phase pilote [46], cf. chapitre 5.1.4), pourrait être adaptée afin de répondre à ce besoin.

Recommandation n°1

L'IRSN recommande que l'Andra mette en œuvre un programme de reconnaissance du Callovo-Oxfordien dans le nord de la ZIOS (quartiers de stockage HA) à l'aplomb des failles nord-sud identifiées dans le Trias-Lias sur la sismique 3D dans le but de lever le doute, en vue du bilan de la phase pilote et en tout état de cause avant le creusement des galeries de liaison qui desserviront le quartier de stockage HA, sur l'éventuel impact de ces failles sur les propriétés du Callovo-Oxfordien.

5.1.3. Conséquences de l'évolution des connaissances tectoniques et structurales sur l'évaluation du SMPP

Pour rappel, la détermination du spectre sismique à considérer pour l'évaluation du risque sismique après fermeture est fondée sur la recherche des caractéristiques du séisme maximal physiquement possible (**SMPP**), sur la base du contexte tectonique du site, en vue de couvrir les incertitudes sur la période considérée, de deux à trois ordres de grandeur supérieures à la période des mesures historiques⁴¹. Ce concept de SMPP revient à considérer que toutes les failles du secteur peuvent être actives à long terme et à définir la magnitude des séismes qu'elles peuvent générer en considérant qu'elles sont activées sur toute leur surface (longueur et profondeur). Pour ce faire, au stade du DOS, l'Andra avait notamment établi un « modèle structural régional » prenant en compte les failles du modèle structural de MHM de plus grandes dimensions, les plus proches étant les failles de Gondrecourt et de Poissons. Le présent chapitre porte sur l'incidence potentielle des mises à jour du schéma structural mentionnées aux chapitres 5.1.2.1 et 5.1.2.2 sur ce modèle structural régional.

S'agissant des failles de Gondrecourt, l'Andra retient, pour le SMPP, un système de failles de 2 km de profondeur (épaisseur de la couverture sédimentaire). Considérant que ce système de failles, au total d'une quarantaine de kilomètres de long, n'est pas constitué de failles continues, l'Andra retient une rupture sur un tronçon de faille de 10 km. **L'IRSN convient qu'il est très probable que le système de failles de Gondrecourt soit discontinu et considère que, même si certaines portions du système peuvent être enracinées dans le socle, le choix d'une surface de faille activée de 20 km² apparaît globalement pénalisant.**

S'agissant de la faille de Poissons, elle se présente dans le schéma structural révisé comme une faille de relais entre un segment N030° du système des failles de la Marne au nord et la faille de Brouthières au sud, où elle s'amortit en profondeur et devient une faille secondaire conjuguée antithétique⁴² de la faille de Brouthières. Selon la nouvelle cartographie présentée au stade du DDAC, la faille de Poissons est longue d'une vingtaine de kilomètres à la base du Trias et de 15 km en surface. Aussi, malgré cette légère révision, l'Andra indique que cela ne nécessite pas de réviser ni la longueur de 21,6 km ni la profondeur de 15 km retenues pour l'évaluation du

⁴¹ La durée passée relative aux mesures instrumentales de la sismicité est d'ordre centenaire et celle des observations (paléoséismes...) d'ordre millénaire.

⁴² Une faille conjuguée s'est formée lors du même épisode tectonique que la faille principale ; elle est synthétique si elle est inclinée dans la même direction et antithétique si elle est inclinée dans la direction opposée.

SMPP au stade du DOS. **Ces éléments concernant la prise en compte de la faille de Poissons pour l'évaluation du SMPP n'appellent pas de remarque.**

S'agissant enfin de la prise en compte des failles nord-sud du Trias-Lias, non considérées par l'Andra pour la définition de l'aléa sismique de niveau SMPP, l'IRSN estime qu'elles peuvent être caractérisées, selon les lois d'échelle classiques, par des dimensions de quelques kilomètres de long sur quelques centaines de mètres de hauteur. Malgré leur faible dimension, l'IRSN considère qu'elles seraient, du fait de leur proximité à la zone de stockage (à moins de 300 m en-dessous) à même de générer des séismes de faible magnitude et devraient de ce fait être prise en compte dans l'évaluation du SMPP. En effet, à l'image du séisme du Teil initié en Ardèche en 2019 sur une faille de même dimension à une profondeur d'ordre kilométrique, l'IRSN rappelle la possibilité d'occurrence de séismes au sein de la pile sédimentaire. **L'IRSN estime donc que l'Andra pourrait vérifier que le spectre d'aléa SMPP retenu est enveloppe de celui associé à un séisme qui surviendrait sur une des failles affectant le Lias et le Trias dans l'emprise de la ZIOS.**

La magnitude retenue pour des événements sismiques se produisant sur les failles de Poissons et de Gondrecourt, le spectre d'aléa SMPP retenu par l'Andra pour la phase après fermeture ainsi que le spectre de dimensionnement qui en est déduit sont analysés dans le cadre du GP3.

Concernant l'évolution du champ de contraintes sur le prochain million d'années, l'Andra considère, comme au stade du DOS, que celui-ci ne sera pas modifié de façon significative compte tenu des constantes de temps, se comptant en dizaines de millions d'années, de l'évolution géodynamique et tectonique (rapprochement Europe-Afrique et ouverture de l'Atlantique) [81]. L'Andra s'était cependant engagée (2017-E-64) à justifier, dans le DDAC, le spectre d'aléa SMPP retenu en regard en particulier d'une possible évolution des contraintes tectoniques, notamment en lien avec les futures périodes glaciaires. Aussi, l'Andra a précisé au cours de la présente instruction avoir mené des études abordant l'impact des phénomènes transitoires sur le champ de contraintes [121]. L'Andra conclut de ces travaux que les perturbations transitoires des contraintes tectoniques engendrées par le rebond isostatique post-glaciaire « GIA » (Glacial Isostatic Adjustment) pourraient favoriser ou inhiber temporairement le déclenchement de séismes sur certaines des failles du secteur MHM, notamment la faille de Poissons. Toutefois, l'Andra précise qu'aucun paléoséisme ni indice néotectonique du dernier million d'années n'ont été identifiés sur les failles avoisinantes de la ZT, et donc que les dernières glaciations ne semblent pas avoir eu d'impact en termes de sismicité sur le secteur de MHM. L'Andra conclut que ces phénomènes de variations de contraintes transitoires en lien avec les glaciations ne remettent pas en question l'évaluation de l'aléa sismique après-fermeture couvert par le spectre SMPP associé à la faille de Poissons. **L'IRSN souligne la qualité des données et des études présentées, et encourage l'Andra à poursuivre ses efforts pour caractériser l'activité tectonique récente des failles du secteur de MHM, notamment des failles de la ZFD, par exemple en tirant profit de méthodes d'analyse géochimiques et de microtectonique⁴³ pour confirmer ou infirmer l'absence d'activité sismique récente liée au GIA.**

Le lien entre le champ de contraintes au niveau du site et les déformations régionales, notamment la vitesse des failles, permettant d'évaluer la période de retour des séismes associés aux spectres de référence SMS et SMPP, est examiné dans le cadre des GP2 et GP3 relatifs à la sûreté en exploitation et après fermeture du stockage.



5.1.4. Stratégie de reconnaissances géologiques du site

Les principales incertitudes résiduelles sur la géologie du site que l'Andra a recensées [116] concernent le contexte structural et tectonique (cf. ci-dessus), la géométrie et les propriétés du COX (cf. chapitre 6.1) ainsi que certaines propriétés des aquifères des formations encaissantes (cf. chapitre 5.4). La géologie de la ZIOS n'ayant été reconnue qu'indirectement (cartographie de surface et méthodes géophysiques) et par interpolations entre forages situés en périphérie, l'Andra prévoit de consolider cet état des connaissances et les modèles conceptuels qui en découlent avec les données qui seront acquises lors des prochaines campagnes de reconnaissance [45].

⁴³ Il pourrait par exemple être réalisé une datation des dépôts de calcites sur les miroirs de failles (e.g. [122]), puis une mesure des épisodes de déformation (e.g., [123]) ou de contraintes [124][125] enregistrés dans les calcites les plus récentes pour rechercher d'éventuelles traces d'activité quaternaire.

Ainsi qu'indiqué ci-dessus, l'Andra prévoit deux campagnes de reconnaissance visant à réduire les incertitudes précitées.

S'agissant de la campagne ZBS, celle-ci permettra selon l'Andra [119] de conforter et préciser le modèle géologique 3D du COX (géométrie, pétrophysique, valeurs des propriétés intrinsèques THM, hydrauliques et de transfert, champ de contraintes naturelles) et des différentes formations géologiques sus-jacentes, à l'échelle de la ZIOS. Cette campagne comprend 13 forages allant jusqu'à l'Oxfordien calcaire, au COX ou au Dogger à partir de quatre plateformes situées en périphérie de la ZIOS (1 à 2 km) ainsi que quatre profils sismiques les reliant à la ZIOS. Les premiers résultats seront disponibles fin 2026 et le collationnement des rapports de mesure est prévu début 2028. L'adéquation entre les objectifs de cette campagne et les moyens prévus pour réduire ces incertitudes est analysée par l'IRSN au fil du présent rapport concernant les phénomènes ou paramètres investigués (zone de flexures potentielles ci-avant, hydrogéologie de l'Oxfordien calcaire et âge des eaux au chapitre 5.4.2, charges hydrauliques au chapitre 6.1.1, minéralogie du COX au chapitre 9).

S'agissant des reconnaitances à l'avancement du creusement [46], l'Andra indique qu'elles viseront à vérifier la géométrie du COX, ses propriétés en lien avec le dimensionnement des ouvrages et l'analyse de sûreté ainsi qu'à caractériser la zone endommagée, notamment au droit des futures zones où seront mis en place les scellements. L'Andra ne mentionne pas d'objectif de reconnaissance lors du creusement au travers des couches sus-jacentes au COX. L'Andra compte réaliser des forages sur toute la hauteur des puits, mais seulement sur des sections partielles à partir du front de taille lors d'arrêts de creusement pour les descenderies et les galeries. Les zones de forage ciblées et leurs caractéristiques (destructif ou carotté, crépiné etc.) ne sont pas précisées à ce stade. Concernant le niveau principal du stockage, l'Andra précise que les technologies de caractérisation à distance (imagerie et analyse spectrale) éprouvées au LSMHM ont démontré la capacité de réaliser un suivi géologique continu pendant le creusement, avec un contrôle assuré par un géologue sur place, sans intervention directe sur la paroi, préservant ainsi les performances d'avancement et la sécurité du personnel.

Concernant le creusement des puits, l'IRSN approuve le choix par l'Andra de réaliser des forages en avant-trou mais souligne le besoin potentiel de carotter les zones qui pourraient être sensibles à des risques tels que l'instabilité ou l'inondation, notamment les zones potentiellement karstifiées du Barrois et les niveaux aquifères du Kimméridgien et de l'Oxfordien. A ce titre, l'IRSN estime que le puits VVE dédié au retour d'air vicié de la « zone exploitation », du fait de son caractère indispensable au fonctionnement de Cigéo qui contraint fortement les possibilités d'arrêt prolongé pour maintenance ou jouvence, pourrait faire l'objet d'un carottage tout au long du forage en avant-trou. Enfin, au vu de l'incertitude concernant la profondeur du toit du COX au droit de la ZIOS (chapitre 2.1.3), une reconnaissance précise de cette zone par un forage carotté semble opportune avant la pose des soutènements et revêtements à l'emplacement des futurs scellements de LSF à l'interface calcaire-argiles de l'Oxfordien inférieur. Cette reconnaissance préalable est d'autant plus importante que l'Andra envisage un creusement par « foration/tir » qui, outre son caractère agressif pour les propriétés de la roche ainsi que développé au chapitre 6.3.3, ne permet pas toujours une identification des couches et une discrimination entre la fracture induite par le creusement et d'éventuelles structures tectoniques. L'IRSN estime en outre qu'une caractérisation à distance telle qu'envisagée par l'Andra ne permet pas une analyse des parois, en termes de minéralogie (repérage des couches traversées) et de structures (identification de potentielles faiblesses), aussi fine que l'observation directe par un géologue. L'IRSN relève enfin que l'Andra étudie la possibilité d'utiliser un tunnelier vertical au titre d'une optimisation possible, ce qui ne permettrait pas, ainsi que pour le tunnelier pleine face (TBM), un examen aisé des parois au cours du creusement.

Concernant le creusement des descenderies et galeries, l'IRSN constate que l'Andra ne prévoit pas de forage en avant-trou et souligne que la méthode pour leur creusement au tunnelier pleine face (TBM), différente de celle utilisée au LSMHM, semble peu compatible (accès physique limité à l'avant d'un tunnelier, principe de creusement et de soutènement continu...) avec la réalisation, devant le front de creusement, de forages dont la longueur serait suffisante pour avoir un continuum de suivi des zones excavées. L'IRSN estime que la reconnaissance de la roche traversée est aussi indispensable qu'au niveau des puits, au moins au passage des zones précitées (en lien avec les risques en exploitation et la pose des scellements de LSF), du fait que ces

ouvrages devront rester intègres pendant plus d'un siècle ou assurer un rôle majeur pour la sûreté à long terme. **L'IRSN estime donc que l'Andra pourrait privilégier la mise en œuvre d'une reconnaissance par forage incliné partiellement carotté dans l'axe d'au moins une des descenderies au niveau des zones susceptibles de nécessiter un dimensionnement particulier du génie civil avant le début de leur creusement au tunnelier.**

Concernant enfin le creusement du niveau principal du stockage, l'IRSN rappelle que l'expérience de l'Andra acquise au LSMHM ne concerne à ce stade que l'utilisation de méthodes d'abattage mécanique conventionnelles (BRH et TAP) et que l'usage envisagé par l'Andra du TBM pour le pourtour de la zone MA-VL et des alvéoles MA-VL [121] ne semble pas permettre, ainsi qu'indiqué *supra*, une analyse fine des parois avant que le revêtement ne soit posé. **L'IRSN souligne que la stratégie de reconnaissance de la roche hôte au cours du creusement de Cigéo constitue un enjeu fort pour les raisons mentionnées *supra*.**

L'ensemble de ces points est repris dans le cadre du GP2 pour l'examen de la stratégie de reconnaissance à l'avancement du creusement des ouvrages de Cigéo, au regard notamment de la prévention des risques géotechniques et d'inondation en exploitation.



5.2. Ressources naturelles du sous-sol

Le Guide n°1 de l'ASN [4] indique que « *le site devra être choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines* » afin de ne pas les stériliser. Dans cet objectif, l'Andra évalue depuis plusieurs décennies les ressources naturelles souterraines sur la ZT en se basant sur la définition du code minier, à savoir les matériaux de carrières, les substances minérales, le charbon, les hydrocarbures « conventionnels » ainsi que les ressources géothermiques. L'Andra conclut dans le DDAC à l'absence de nouveaux éléments qui pourraient remettre en cause celles émises dans ses rapports précédents quant au caractère non exceptionnel de ces ressources [40].

S'agissant des quatre premiers types de ressources naturelles, l'IRSN concluait en 2005 [9] à l'absence de ressource exceptionnelle connue dans l'environnement de la ZIOS qui soit exploitable dans les conditions technico-économiques d'alors (Annexe T14). Au vu des éléments présentés au stade du DDAC et en l'absence d'évolution notable sur le plan technico-économique, **les conclusions de l'Andra quant à l'absence de telles ressources d'intérêt n'appellent pas de nouveau commentaire de la part de l'IRSN.**

S'agissant du potentiel géothermique du site de MHM, en s'appuyant notamment sur les résultats du forage EST433 de 2 000 m de profondeur réalisé en 2007 sur la commune de Montiers/Saulx (Figure 1) dans le cadre du programme TAPPS, l'IRSN convenait en 2013 [126][127] qu'il n'existait pas de potentiel exceptionnel rentable des aquifères du Trias à l'aplomb de la ZIOS pour des raisons de salinité excessive, de gradient géothermique normal (notamment du fait de l'absence d'activité volcanique sous-jacente) et de caractéristiques hydrauliques peu propices à une exploitation, notamment pour une ressource de type basse énergie (BE) (cf. Annexe T14). Concernant l'exploitation d'une ressource de moyenne ou haute énergie (ME, HE), l'Andra indique comme au stade du DOS qu'« *il serait nécessaire d'atteindre des profondeurs minimales de l'ordre de 3 km pour de la géothermie ME et de l'ordre de 5 km pour de la géothermie HE* » [81]. Au cours de la présente instruction, l'Andra a précisé avoir mené, en se basant sur la méthode proposée par [128]⁴⁴, une étude comparative entre le potentiel géothermique du Trias au niveau de la ZIOS (ressources BE, ME et HE confondues) et d'autres territoires déjà exploités ou évalués. Cette méthode a été appliquée sur le Trias du Bassin parisien [128] et du fossé rhénan [129], ce qui permet de disposer de données de comparaison avec le Trias du secteur de MHM dont les valeurs sont calculées, au droit de la ZIOS, sur la base des épaisseurs des différents niveaux aquifères relevés au forage EST433 [130] (cf. Figure 2). Les résultats obtenus indiquent que le potentiel géothermique du Trias de la ZIOS est moindre, à superficie équivalente, que celui du Bassin parisien et très inférieur à celui du fossé rhénan, **ce dont l'IRSN convient.**

⁴⁴ Cette méthode de calcul de la quantité de chaleur présente dans la roche intègre les volumes des formations géologiques rencontrées et leurs propriétés thermiques.

Par ailleurs, s'agissant du potentiel du site à l'aplomb de la ZIOS en termes d'hydrocarbures non conventionnels (HNC), l'Andra indique comme au stade du DOS que le Toarcien (schistes carton) n'est pas suffisamment mature pour avoir généré des hydrocarbures conventionnels et que leur extraction (HNC) nécessiterait de passer par des méthodes de cracking thermique, technique à l'état de recherche à ce jour, et que cette ressource ne peut être considérée comme exceptionnelle à l'échelle de la France (cf. Annexe T14). S'agissant du Stéphaniensien et du Westphalien, l'Andra réitère sa remarque émise au stade du DOS selon laquelle leur exploitation requerrait le recours à la technique de fracturation hydraulique, actuellement interdite en France. Enfin, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que la réalisation d'une évaluation comparative de cette ressource avec celle d'autres régions, suggérée par l'IRSN à l'issue du DOS pour appuyer ces conclusions, nécessiterait de nombreuses données à acquérir par forage d'exploration, ce qui est également interdit. **L'IRSN partage ces remarques.**

L'IRSN suggérerait [30] néanmoins au stade du DOS que l'Andra mène des études pour préciser la provenance des alcanes présents à l'état de trace dans le COX dans l'optique d'évaluer si une source exploitable de ce type d'hydrocarbures était susceptible de se trouver dans le secteur de MHM. Pour rappel, l'Andra a détecté du méthane (CH₄) et d'autres alcanes dissous dans les eaux porales du COX du LSMHM (0,36 à 1,28 mg/L de CH₄ à 445 m de profondeur et 0,56 à 1,55 mg/L à -490 m), dont la composition isotopique témoigne d'une origine thermogénique, c'est-à-dire formée du fait de l'enfouissement du COX et non du fait d'une activité bactérienne. L'Andra a précisé au cours de l'instruction avoir réalisé des simulations de transport de solutés [131] montrant que le profil de méthane mesuré sur des carottes issues du forage profond EST433 peut être reproduit en considérant deux sources principales, à savoir le Carbonifère et le Lias, avec potentiellement un apport mineur du COX. **L'IRSN estime que cette étude est suffisante pour considérer que les alcanes présents dans le COX ont une provenance diffuse sans potentiel économique en l'état des techniques disponibles comme souligné ci-dessus.**



5.3. Géodynamique passée et évolution géoprospective

L'évolution géoprospective du site de MHM désigne l'évolution future du relief (géomorphologie) en fonction des phénomènes géodynamiques internes (surrection...) et externes (érosion, sédimentation...) ainsi que du climat. Elle influence le transport des radionucléides, notamment du fait que l'incision des rivières peut conduire à la mise à l'affleurement d'aquifères initialement sous couverture et ainsi à la création de nouveaux exutoires des eaux souterraines, potentiellement plus proches du site de Cigéo que les exutoires actuels (cf. chapitre 5.4.1).

5.3.1. Evolution géoprospective déduite des observations géologiques

Le présent chapitre porte sur les cartes d'évolution géoprospective du site, établies par l'Andra en appliquant d'une part un modèle de surrection, d'autre part un modèle d'érosion (intégrant l'érosion générale des plateaux et l'incision des rivières) à partir du relief actuel du site [133]. Ces cartes d'évolution géoprospective sont ensuite appliquées au modèle hydrogéologique du site afin de simuler les écoulements souterrains « géoprospectifs » (sur la période après fermeture du stockage). Les travaux de simulation sont examinés au chapitre 5.4.2.3.

Modèle de surrection

Le modèle de surrection de l'Andra est établi sur la base des observations géologiques résultant des phénomènes géodynamiques passés, c'est-à-dire considérant une évolution naturelle du climat. L'Andra retient, dans le DDAC, deux cartes de taux de surrection pour la période du Quaternaire, déjà présentées au stade du DOS : une carte dite « *maximaliste* » et une carte dite « *réaliste* » (cf. Annexe T15) [133]. Au stade du DDAC, ces cartes sont utilisées par l'Andra pour simuler les écoulements géoprospectifs, respectivement dans les situations enveloppe et de référence du scénario d'évolution normale (SEN)⁴⁵.

⁴⁵ Le scénario d'évolution normale (SEN) et les scénarios d'évolution altérée (SEA) constituent chacun une situation particulière d'évolution du stockage à long terme permettant de vérifier la performance et tester la robustesse du système de stockage dans son ensemble et l'apport de chaque composant.

...

La carte « *maximaliste* » a été établie en considérant que les massifs périphériques du bassin de Paris se sont en partie formés au cours du Quaternaire, ce qui maximise les taux de surrection, pris égaux à l'incision des rivières. Ces taux de surrection sont de l'ordre de 60-80 m/Ma sur le secteur de MHM. L'IRSN estimait au stade du DOS que l'approche suivie par l'Andra pour cette carte conduisait à retenir des taux de surrection élevés, très enveloppes de la réalité. À l'inverse, la carte de surrection « *réaliste* » considère que l'incision s'est faite sur des reliefs en partie préexistants, ce qui conduit à une surrection de l'ordre de 25 m/Ma sur le secteur de MHM. L'IRSN estimait au stade du DOS que la démarche consistant à tenir compte des phénomènes « externes » (eustatisme⁴⁶, captures) était pertinente pour déduire les taux de surrection, mais émettait des réserves sur l'absence de données locales sur les rivières de l'Ornain et de la Saulx, sur la méthode d'interpolation retenue générant des biais, sur certaines hypothèses retenues par l'Andra (tectonique inchangée au cours du prochain million d'années, absence d'impact des cycles glaciaires sur la surrection, cf. chapitre 5.1.3) et sur le choix de considérer l'ensemble de la période Tertiaire (i.e. depuis 66 millions d'années) pour déduire des taux de surrection, ce qui masque le régime de déformation plus intense depuis 20 millions d'années (formation des Alpes). L'IRSN concluait qu'il subsiste trop d'incertitude pour convenir de la robustesse du modèle dit « *réaliste* » de surrection future du secteur, à prendre en compte dans le modèle hydrogéologique géoprospectif. Ce point est repris ci-dessous.

Au cours de la présente instruction, l'Andra a précisé que la carte de surrection « *réaliste* » n'a pas été mise à jour et qu'aucune analyse de sensibilité n'a été menée depuis le DOS. L'Andra prévoit néanmoins de réviser le modèle de surrection « *maximaliste* » du bassin de Paris (cf. [135]) en 2026-2027, afin de le rendre plus plausible, par l'intégration des phénomènes à grande longueur d'onde liés aux mouvements de la lithosphère. **L'IRSN convient de la pertinence de réviser le modèle maximaliste de surrection du bassin de Paris** et suggère à cet égard que l'Andra s'appuie pour cela sur les études récentes exploitant les données GPS [109]) qui quantifient les mouvements verticaux sur la France métropolitaine.

Modèle d'érosion et d'incision

En partant des observations géologiques quaternaires du secteur de MHM utilisées pour établir la carte de surrection réaliste, l'Andra a développé au stade du DOS un modèle d'érosion et d'incision dont les taux en chaque point dépendent non seulement de la surrection, mais aussi de la nature du substratum, du climat ou du profil en long des rivières. Sur cette base, l'Andra a établi des modèles d'évolution géoprospective tenant compte de chacune des deux cartes de surrection évoquées ci-dessus, celles-ci ayant des impacts différents en termes d'érosion et surtout d'incision des rivières. Ainsi, dans le cas d'une évolution géodynamique « *maximaliste* », l'érosion le long de la vallée de l'Ornain au nord de la ZT⁴⁷ est très importante et conduit à ce qu'une partie significative de la couche des marnes du Kimméridgien (cf. Figure 2) soit érodée avec une atteinte de l'Oxfordien au bout de 450 000 ans environ [137] (cf. Annexe T15). À l'inverse, dans le cas d'une évolution géodynamique basée sur une surrection « *réaliste* », l'aquifère de l'Oxfordien reste confiné sous les marnes du Kimméridgien. L'IRSN relève ainsi le caractère significatif de l'incertitude associée au modèle de surrection tectonique, exprimée par les cartes « *réaliste* » et « *maximaliste* », qui se traduit par l'apparition d'un exutoire local de l'Oxfordien dans le secteur de MHM, et donc par une modification des temps de transfert dans cet aquifère entre l'aplomb de Cigéo et la surface. L'influence de l'apparition d'un nouvel exutoire dans l'Oxfordien calcaire sur les écoulements et trajectoires de particules dans cet aquifère est abordée au chapitre 5.4.2 ci-après.

En vue d'une meilleure compréhension du système, et en parallèle de la révision prévue par l'Andra du modèle de surrection « *maximaliste* », l'IRSN estime qu'il conviendrait d'améliorer le modèle « *réaliste* » en corrigeant les points de faiblesse soulignés par l'IRSN dans son rapport d'expertise du DOS [30], rappelés ci-dessus. L'IRSN

Dans le SEN, pour lequel l'Andra distingue une situation de référence et une situation enveloppe, toutes les fonctions de sûreté sont réalisées comme attendu, alors que les SEA sont des scénarios de dysfonctionnement (e.g., [134]). Le SEN est présenté de manière détaillée dans le cadre de l'examen du GP3. La situation de référence du SEN correspond à une situation d'évolution du stockage « au meilleur de la connaissance » alors que la situation enveloppe du SEN est plus conservative, avec notamment des choix de modélisation qui majorent le relâchement des radionucléides.

⁴⁶ Variation du niveau moyen des mers

⁴⁷ La couverture du Kimméridgien ne présente localement qu'une épaisseur de l'ordre de la trentaine de mètres autour de la ville de Ligny-en-Barrois.

ajoute à cet égard que l'amélioration des connaissances sur les mouvements lithosphériques visée par l'Andra pour réviser le modèle de surrection « *maximaliste* » pourrait également permettre d'améliorer le modèle « *réaliste* ». **Aussi, afin d'améliorer les modèles géoprospectifs en support aux évaluations de sûreté à long terme, il appartiendra à l'Andra de mettre à jour la carte « réaliste » du bassin de Paris, en privilégiant les mesures couvrant la période la plus récente dominée par l'orogénèse alpine, en tenant compte des données locales les plus pertinentes et en améliorant la méthode d'interpolation des données. A l'occasion de cette mise à jour, l'Andra pourrait prendre en compte, au plus près des connaissances acquises pour actualiser la carte « maximaliste », les éventuels mouvements futurs différentiels de la lithosphère aux limites du modèle (liés à la tectonique, à l'eustatisme, aux glaciations...) dans la carte « réaliste ».**

5.3.2. Evolution géoprospective tenant compte d'une évolution perturbée du climat

Dans la mesure où l'évolution géomorphologique future du site est liée à celle du climat, il est nécessaire de s'interroger sur l'effet d'un climat perturbé par les activités humaines. Pour étudier cette évolution, l'Andra tient compte des tendances actuelles d'évolution perturbée du climat en fonction du taux de CO₂ dans l'atmosphère, en vue de simuler les évolutions possibles induites sur le climat à long terme.

Ainsi, dans le cadre du projet européen BIOCLIM piloté jusqu'en 2003 par l'Andra (cf. [132]), différents scénarios d'évolution du climat ont été établis sur le prochain million d'années. Ceux-ci incluent notamment un scénario d'évolution naturelle et des scénarios d'évolution perturbée, notamment un scénario d'évolution fortement perturbée⁴⁸. L'Andra a appliqué ces scénarios au secteur de MHM [133]. D'autres projets de recherche auxquels participe l'Andra depuis 2005 ont par ailleurs conduit à établir des scénarios d'évolution de la température et des précipitations affinées dans le temps (pas de temps de 1 000 ans) et dans l'espace (variabilité spatiale à l'échelle du Bassin parisien), et à augmenter la fiabilité de ce modèle de climat perturbé en le couplant notamment avec d'autres modèles climatiques qui intègrent les spécificités de comportement des deux calottes glaciaires. [135]). D'autres projets de recherche auxquels participe l'Andra depuis 2005 ont par ailleurs conduit à établir des scénarios d'évolution de la température et des précipitations affinées dans le temps (pas de temps de 1 000 ans) et dans l'espace (variabilité spatiale à l'échelle du Bassin parisien), et à augmenter la fiabilité de ce modèle de climat perturbé en le couplant notamment avec d'autres modèles climatiques qui intègrent les spécificités de comportement des deux calottes glaciaires.

Pour ce qui concerne les effets de l'évolution climatique perturbée par les activités humaines sur la modélisation géoprospective (*i.e.* sur l'érosion des plateaux et l'incision des cours d'eau), l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que les résultats seraient disponibles au plus tôt en 2028. L'Andra n'indique pas comment ils seront pris en compte dans les scénarios d'évolution géoprospective en vue de l'évaluation de sûreté après la fermeture du stockage. Elle indique toutefois de manière qualitative, sur la base des scénarios développés dans le projet BIOCLIM, que la prise en compte de ces scénarios devrait conduire à une ablation rapide des plateaux calcaires et un alluvionnement massif des vallées, avant la reprise, au-delà 500 000 ans, des cycles glaciaires/interglaciaires ; elle conclut sur cette base que la mise à l'affleurement de l'Oxfordien surviendrait dans ce cas au-delà du million d'années.

L'IRSN estime que l'étude de l'évolution perturbée du climat via l'approche du taux de CO₂ paraît la plus pertinente à ce stade. L'IRSN constate néanmoins que la conclusion de l'Andra relative à un retard au-delà de 500 000 ans de la prochaine glaciation ne tient pas compte des éléments acquis après 2003. Etant donné l'évolution rapide des connaissances sur ce sujet, **l'IRSN encourage l'Andra, pour la mise à jour de ses simulations géoprospectives, à poursuivre son implication dans les projets internationaux relatifs aux connaissances sur l'évolution climatique perturbée par les actions humaines.**

L'IRSN estime en tout état de cause que les modèles d'évolution du climat sur la prochaine centaine d'années, aujourd'hui déduits d'observations sur une très courte période, sont assortis d'une très forte incertitude et par

⁴⁸ Ce scénario retient l'hypothèse extrême d'un rejet de l'ensemble des ressources de carbone fossile évaluées de la planète (5 000 Gt) dans l'atmosphère au cours des 325 prochaines années [81].

conséquent qu'une telle évolution sur des centaines de milliers d'années apparaît d'autant plus incertaine. Aussi, afin de garantir la robustesse des simulations géoprospectives sur le long terme, l'IRSN estime qu'il serait pertinent, du point de vue de la sûreté, d'examiner des scénarios résultant d'évolutions climatiques certes peu probables, mais en rupture avec l'évolution climatique « naturelle ». Par exemple, des scientifiques (e.g., [136]) émettent la possibilité, certes très faible, d'un fort ralentissement de la circulation thermohaline dans le futur en raison de la perturbation anthropique du climat, avec pour conséquence la survenue d'un épisode glaciaire précoce. Ce type d'effet pourrait conduire à l'apparition d'exutoires locaux pour l'aquifère de l'Oxfordien dans des délais raccourcis par rapport aux 450 000 ans simulés par l'Andra en considérant une surrection « maximaliste » selon une évolution climatique « naturelle ». **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra pourrait tenir compte de ce type de situations hypothétiques extrêmes d'évolution géomorphologique conséquentes à une évolution perturbée du climat dans ses travaux relatifs aux évolutions géoprospectives.**



5.4. Hydrogéologie du secteur de Meuse/Haute-Marne

Les données hydrogéologiques et géochimiques acquises dans le secteur de MHM, qui sont abordées au chapitre 5.4.1 et détaillées en Annexe T16, servent de base au développement de modèles hydrogéologiques numériques examinés au chapitre 5.4.2. Ces modèles sont utilisés en support à l'évaluation de la sûreté de l'installation après sa fermeture, qui fait l'objet du GP3.

5.4.1. Caractérisation et conceptualisation des couches aquifères

Ainsi que décrit au chapitre 2.1.2 du présent rapport, les formations sédimentaires sus-jacentes à la roche hôte (COX) sont constituées, de haut en bas, des calcaires du Barrois, du semi-perméable marneux du Kimméridgien et des calcaires de l'Oxfordien. Les formations sédimentaires sous-jacentes à la roche hôte sont constituées des calcaires du Dogger, du semi-perméable du Lias et enfin des formations du Trias.

Le secteur de MHM a fait l'objet de campagnes de reconnaissance géologique entre 1994 et 2010. La dernière campagne d'investigations hydrogéologiques, focalisée sur la ZT, date de 2007-2008. Les connaissances principales ainsi acquises sur l'hydrogéologie et la géochimie de l'Oxfordien, du Dogger et du Trias sont rappelées en Annexe T16.

La campagne de forages ZBS était envisagée pour 2018 et devait permettre d'acquérir des connaissances complémentaires locales notamment sur l'hydrogéologie de l'Oxfordien et du Dogger autour de la ZIOS, mais les premiers résultats de cette campagne sont, du fait de son report, envisagés à l'horizon 2028 (cf. chapitre 5.1). Les données relatives à l'hydrogéologie de ces deux aquifères dans le référentiel de site présenté dans le DDAC sont donc identiques à celles qui ont été expertisées par l'IRSN sur la base du référentiel de site de 2012 en support à l'instruction du DOS. **Ces données n'appelaient alors pas de commentaire particulier de la part de l'IRSN.** Seules certaines données en lien avec les paramètres et hypothèses retenues dans la modélisation hydrogéologique sont donc discutées ci-dessous.

5.4.2. Modélisation hydrogéologique

L'Andra a construit un modèle numérique hydrogéologique à l'échelle du bassin sédimentaire de Paris (BP), examiné au chapitre 5.4.2.1 du présent rapport. De ce modèle « régional » a été extrait un modèle « de secteur » centré sur le site de MHM (chapitre 5.4.2.2) avec pour objectif de déterminer plus précisément l'emplacement des exutoires des eaux souterraines ayant transité au droit de la ZIOS, ainsi que les temps d'arrivée de particules relâchées depuis la ZIOS vers ces exutoires. Sur la base de ce dernier modèle et de connaissances acquises sur l'évolution géodynamique passée du secteur ensuite extrapolées vers le futur (cf. chapitre 5.3), l'Andra a développé un modèle d'écoulements appelé modèle « *géoprospectif* », examiné au chapitre 5.4.2.3. L'ensemble de ces travaux de modélisation numérique des écoulements est décrit dans [137].

5.4.2.1. Modélisation numérique à l'échelle du bassin de Paris (modèle régional)

Le modèle hydrogéologique régional de l'Andra est composé de 27 couches représentant le bassin sédimentaire de Paris et allant du Trias inférieur (Buntsandstein) au Tertiaire supérieur. Il couvre une superficie de 250 000 km². La modélisation des écoulements souterrains réalisée à l'échelle du BP a très peu évolué par rapport à celles présentées au stade du DOS. L'Andra [137] avait calé son modèle sur la base de 1 255 mesures de charges hydrauliques réparties sur l'ensemble du système aquifère « multicouche » notamment dans les aquifères de l'Albien et du Dogger, en considérant les failles comme hydrauliquement « transparentes », c'est-à-dire ne présentant pas de différence de transmissivité avec le milieu qu'elles traversent. L'écart moyen de 8 m obtenu entre les valeurs simulées et les charges mesurées au niveau des forages était jugé satisfaisant à cette échelle par l'IRSN.

Dans le DDAC, l'Andra a conservé le même calage initial pour étudier la sensibilité des écoulements, puis des teneurs en sel des eaux⁴⁹, à l'activation des grandes failles régionales. Ces éléments ont été précisés au cours de l'instruction [138]. S'agissant des écoulements, l'analyse de sensibilité a permis à l'Andra d'identifier les paramétrages des failles⁵⁰ conduisant à une moindre détérioration des charges hydrauliques simulées en l'absence d'activation des failles et montré que cette activation n'était pas de nature à modifier les écoulements dans l'Oxfordien et le Dogger dans le secteur de MHM. S'agissant du transport de sel, l'Andra conclut de son analyse que l'activation des failles est nécessaire pour reproduire les tendances de répartition des salinités observées dans les forages du bassin de Paris.

L'IRSN souligne que l'étude de l'Andra a permis de préciser le rôle hydraulique des structures principales identifiées à l'échelle du bassin de Paris, non seulement sur les écoulements mais aussi sur le transport de sel, ce qui est saluable. L'IRSN constate que l'Andra n'a à ce stade pas vérifié si le modèle permettait de reproduire correctement les charges hydrauliques et les salinités mesurées dans le reste du bassin de Paris, notamment à son centre où de nombreuses mesures sont disponibles, avec un même jeu de paramètres hydrodynamiques du modèle. Néanmoins, l'Andra a montré que ces structures principales ne contraignent pas de manière importante les charges hydrauliques dans le secteur de MHM. Aussi, **l'IRSN considère que les hypothèses de calage du modèle régional peuvent être considérées comme suffisamment représentatives du comportement des écoulements à cette échelle pour que ce modèle régional permette d'établir les conditions aux limites appropriées aux modélisations effectuées à l'échelle du secteur de MHM.**

5.4.2.2. Modélisation numérique à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne

Le modèle du secteur de MHM présenté dans le DDAC correspond à une zone de 80 km × 240 km centrée sur le site de MHM et s'étendant vers l'est jusqu'aux affleurements. Ce modèle est également très similaire à celui présenté au stade du DOS. Il a néanmoins été affiné en prenant en compte une correction de la géométrie du système multicouche au droit de la ZIOS, ainsi qu'une extension des failles de la ZFD vers le sud-est au-delà des failles de Gondrecourt. En outre, alors qu'au stade du DOS seules les porosités totales étaient considérées, l'Andra retient, dans certaines des simulations du transport de particules⁵¹ présentées dans le DDAC, des valeurs de porosité cinématique égales à 40 % des valeurs de porosité totale, ce qui revient à une augmentation des vitesses d'écoulement d'un facteur 2,5.

L'Andra a également modifié dans son modèle la structure de la « Série grise » présente au sein de l'Oxfordien calcaire. Pour rappel, cet aquifère contient des horizons poreux intercalés, selon les forages de la ZT, de couches marneuses constituant cette « Série grise » (cf. Annexe T16). Du fait de leur faible perméabilité, celles-ci

⁴⁹ La salinité des eaux des aquifères du bassin de Paris est principalement issue de niveaux salifères présents dans le Trias (Keuper) situés dans la partie Est du bassin sédimentaire.

⁵⁰ Ce paramétrage a consisté à utiliser un facteur multiplicatif à appliquer aux conductivités hydrauliques associées aux failles dans le but de leur affecter un rôle plus ou moins perméable à l'écoulement.

⁵¹ Pour estimer les directions et vitesses d'écoulement dans les encaissements, des particules sont « injectées » (dans le modèle) au droit de la ZIOS : (i) à la base de l'Oxfordien calcaire et (ii) au toit du Dogger.

structurent globalement l'aquifère de l'Oxfordien en deux nappes (Oxfordien moyen et Oxfordien supérieur⁵²) dans la partie nord-est du secteur où l'épaisseur cumulée de ces marnes est d'ordre plurimétrique, tandis que l'Oxfordien est considéré comme une nappe unique dans le reste du secteur où la Série disparaît. Ainsi, dans le modèle hydrogéologique numérique présenté au stade du DDAC, les couches marneuses sont représentées par des épaisseurs cumulées d'environ 25 m au nord-est de la ZT et de 8 m au droit de la ZIOS. Cette épaisseur cumulée est ainsi notablement diminuée par rapport à celle de l'ordre de 120 m retenue au stade du DOS. Selon l'Andra [37], la présence de la Série grise limite les transferts entre les différents horizons poreux de l'Oxfordien au niveau de la ZIOS.

Le calage des charges hydrauliques simulées dans les encaissants du COX a été réalisé en divisant l'Oxfordien et le Dogger en respectivement 9 et 8 zones de calibration⁵³. Les transmissivités ainsi retenues, au niveau de la ZT, sont pour les niveaux poreux de l'Oxfordien de l'ordre de 10^{-6} m²/s (à comparer aux mesures de transmissivité globale en forage comprises entre 10^{-7} et 10^{-5} m²/s, cf. Annexe T16) et pour le Dogger de l'ordre de 10^{-6} m²/s à 10^{-5} m²/s (à comparer aux mesures comprises entre 10^{-9} et 10^{-5} m²/s). Pour les trois couches marneuses de la Série grise, l'Andra retient des valeurs de perméabilité verticale de 10^{-12} m/s et de perméabilité horizontale de 10^{-11} m/s, soit un ordre de grandeur plus élevé qu'au stade du DOS. En complément, l'Andra affecte, comme au stade du DOS, un rôle drainant aux failles du secteur orientées nord-ouest/sud-est du fait de leur orientation parallèle à la contrainte tectonique majeure et un rôle étanche aux failles orientées nord-est/sud-ouest, perpendiculaires à cette contrainte tectonique. Enfin, l'Andra a implémenté dans son modèle, comme au stade du DOS, une « fracturation mineure » au niveau de la ZFD, générée statistiquement sur la base des directions des failles majeures dans le secteur et des mesures de fracturation sur les encaissants.

D'après les compléments apportés au cours de la présente instruction, il ressort que le modèle retenu dans le DDAC est calé avec un écart moyen entre charges hydrauliques calculées et mesurées de 2,5 m sur les charges dans l'Oxfordien supérieur, de 2 m dans l'Oxfordien moyen et de 2 m dans le Dogger. Sur la base de ce modèle de référence, l'Andra a simulé sur une période d'un million d'années les trajectoires convectives de particules, relâchées au droit de la ZIOS, dans les encaissants du COX. Dans l'Oxfordien moyen, directement sus-jacent au COX, ces trajectoires de particules sont orientées vers la zone nord des failles de la Marne, distante d'une trentaine de kilomètres de la ZIOS, avec une vitesse de pore moyenne (dans le cas prenant pour référence une porosité cinématique égale à 40 % de la porosité totale) d'environ 4 km / 100 000 ans sur la ZT (cf. Figure 22) et un temps de transfert convectif jusqu'à cette zone de l'ordre de 500 000 ans. Dans le Dogger, les trajectoires sont également orientées vers le nord des failles de la Marne avec une vitesse de pores de l'ordre de la dizaine de kilomètres par 100 000 ans au droit de la ZT (cf. Figure 22). L'Andra justifie la vitesse plus importante simulée dans le Dogger par rapport à l'Oxfordien par le très faible gradient hydraulique (0,1%) observé dans le Dogger au niveau de la ZT (cf. Annexe T16). A l'atteinte des failles de la Marne, une partie des trajectoires de particules est déviée vers le sud et aboutit à un exutoire dans la Marne à environ 30 km au sud de la ZIOS (cf. Figure 22) après un temps de transfert inférieur à 500 000 ans.

⁵² L'Oxfordien moyen correspond globalement aux horizons poreux Hp1 à Hp4 observés au LSMHM et l'Oxfordien supérieur aux Hp5 à Hp7.

⁵³ Zones dans lesquels les paramètres hydrodynamiques retenus sont homogènes.

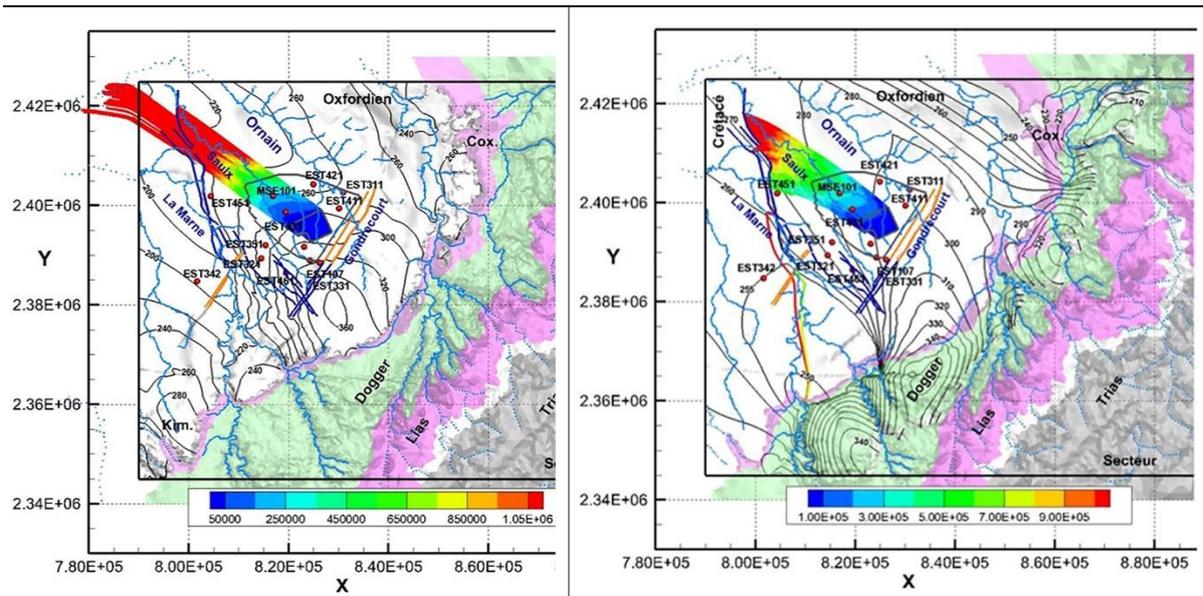


Figure 22. Trajectoires du panache de particules dans l’Oxfordien moyen (gauche) et dans le Dogger (droite) [137]

Enfin, l’Andra a rappelé au cours de l’instruction que les âges moyens des eaux, estimés avec le modèle hydrogéologique de référence tel que développé au stade de 2012, de l’ordre de 180 000 ans dans le forage EST331 et de 330 000 ans dans le forage EST351, étaient cohérents avec les âges apparents mesurés par datation au chlore 36 (de 190 000 ans et 400 000 ans respectivement, cf. Annexe T16). A cet égard, l’Andra considérait, au stade du DOS, que les données géochimiques acquises dans les autres forages ne pouvaient pas être utilisées du fait d’incertitudes trop importantes associées aux différentes méthodes de datation. Ces estimations des temps de résidence des eaux effectuées sur la base de données géochimies n’ont pas été actualisées depuis celles présentées dans le Dossier 2005. L’Andra a toutefois indiqué, au cours de la présente instruction, que la campagne ZBS devrait permettre de réaliser de nouvelles mesures.

L’ensemble de ces éléments appelle les remarques suivantes de la part de l’IRSN.

S’agissant de la précision du calage du modèle de l’Andra, l’IRSN estime que l’écart moyen de l’ordre de 2 m est **globalement satisfaisant**. Dans le détail toutefois, l’IRSN relève que les charges hydrauliques simulées dans l’Oxfordien supérieur présentent un écart d’environ 5 m par rapport aux mesures au niveau des forages situés au nord-est de la ZT (EST311 et EST411), qui pourrait être diminué par une meilleure paramétrisation de la Série grise, ainsi qu’indiqué *infra*.

S’agissant du paramétrage des failles, l’IRSN considère que l’extension de la représentation de la ZFD vers le sud-est est plus cohérente avec les résultats de la cartographie structurale compilés par l’Andra (cf. chapitre 5.1.2.1) ; la paramétrisation retenue au stade du DOS pouvait en effet tendre à sous-estimer localement les vitesses de transfert des eaux des aquifères depuis leur zone de recharge jusqu’à la ZIOS. Aussi, l’IRSN considère que le paramétrage des failles à l’échelle du secteur de MHM **est satisfaisant**.

S’agissant du paramétrage de la Série grise, l’IRSN estime comme dans son expertise du DOS que l’Andra retient une épaisseur excessive pour la représenter dans le modèle hydrogéologique. En effet, l’IRSN relève que :

- les épaisseurs cumulées retenues dans le modèle pour la Série grise (de l’ordre de 25 m au nord-est de la ZT et 8 m au droit de la ZIOS dans le DDAC ainsi qu’évoqué *supra*), sont beaucoup plus importantes que celles observées sur les données issues des logs des forages (10 m à 15 m au NE de ZT et épaisseurs beaucoup plus faibles au droit de la ZIOS).
- les données acquises à ce jour dans tous les forages de la ZT (cf. Annexe T16), y compris ceux situés dans la partie nord-est, n’indiquent pas de charges hydrauliques différentes entre les nappes de l’Oxfordien

supérieur et de l'Oxfordien moyen, ce qui aurait appuyé l'hypothèse de deux nappes rendues indépendantes à cette échelle par la présence de couches épaisses de ces marnes.

L'IRSN observe en outre que les données géochimiques des eaux (cf. Annexe T16) tendent à indiquer une limite d'extension des marnes de la Série grise située au nord-est du forage EST411, soit une séparation des deux nappes de l'Oxfordien uniquement dans une zone située plusieurs kilomètres au nord-est de la ZIOS. L'IRSN souligne enfin que la valeur de perméabilité verticale de 10^{-12} m/s retenue pour la Série grise semble particulièrement faible pour des niveaux décrits dans les logs comme des « marnes » ou des « calcaires argileux ».

L'IRSN estime que ce paramétrage pourrait être à l'origine de l'écart de l'ordre de 5 m constaté au nord de la ZT entre le modèle et les observations. A cet égard, l'IRSN rappelle, comme à l'issue de l'instruction du DOS, que la conceptualisation des marnes de la Série grise mérite une attention particulière afin de s'assurer qu'elle ne conduit pas, dans les simulations numériques, à maintenir artificiellement dans le niveau inférieur de l'Oxfordien une partie des particules transitant entre la ZIOS et les exutoires et ainsi à minimiser la part des particules atteignant ces exutoires. Aussi, **les futures données relatives à la géométrie et aux propriétés hydrodispersives de ces couches marneuses de la Série grise, ainsi qu'au gradient hydraulique entre les niveaux aquifères de l'Oxfordien, que l'Andra prévoit d'acquérir via la campagne ZBS, constituent un attendu important de cette campagne.**

S'agissant des valeurs de porosité cinématique retenues par l'Andra, l'IRSN estime que la prise en compte de valeurs inférieures aux porosités totales **est satisfaisante**. L'IRSN estime de plus que le ratio de 40 % retenu équivaut à des porosités cinématiques comprises entre 2 % et 10 %, soit cohérentes avec la valeur de 8-9 % estimée à l'aide du traçage entre les forages EST311 et EST312/EST313 (cf. Annexe T16) et avec celles issues de la littérature⁵⁴. L'IRSN constate néanmoins que peu de connaissances sont disponibles sur la porosité cinématique de l'Oxfordien calcaire dans le secteur de MHM. Or, les vitesses d'écoulement sont directement proportionnelles à ce paramètre, qui influence donc significativement les simulations en support aux évaluations de sûreté. Aussi, **il appartiendra à l'Andra d'acquérir, lors de la campagne ZBS, des données relatives à la porosité cinématique dans l'Oxfordien calcaire afin de réduire les incertitudes sur ce paramètre.**

S'agissant des valeurs de transmissivité retenues dans le Dogger, l'IRSN constate, sur la base des éléments transmis au cours de l'instruction, que celles-ci sont, comme au stade du DOS, pour la plupart supérieures aux mesures et que la difficulté du calage en charge dans certaines zones est liée au fait qu'un grand nombre de points de mesure se trouvent dans une même zone de calibration (l'une d'entre elle couvrant approximativement toute la ZT où se trouvent six forages). L'IRSN rappelle également, ainsi qu'indiqué dans son expertise du DOS, que bien qu'une transmissivité élevée ait été mesurée au niveau d'un forage (EST432, situé dans une zone de calcaires granulaires très poreux du Bathonien, cf. Annexe T16), les données hydrogéologiques et géochimiques dans leur globalité tendent au contraire à mettre en avant une faible transmissivité des horizons producteurs du Dogger et une probable absence de connectivité des zones les plus transmissives (cf. [139]). Aussi, comme au stade du DOS, l'IRSN considère que la généralisation d'une forte transmissivité du Bathonien à toute la ZT dans le modèle hydrogéologique n'apparaît pas justifiée par les mesures et que les valeurs retenues mériteraient de refléter davantage les mesures réalisées en forages. **L'IRSN encourage pour cela l'Andra à affiner le paramétrage du Dogger en termes de nombre de zones de calibration.**

S'agissant des vitesses d'écoulement simulées, l'IRSN observe que pour l'Oxfordien, le temps de transfert convectif des particules entre la ZIOS et la zone des failles de la Marne est légèrement plus important, mais du même ordre de grandeur, que celui de 300 000 ans qu'il obtient dans le cadre de sa propre modélisation (cf. Annexe 17). Aussi, comme dans son expertise du DOS, l'IRSN estime que les vitesses de transfert à l'échelle du secteur pourraient être supérieures à celles estimées par l'Andra. Pour ce qui concerne le Dogger, l'IRSN indiquait à l'issue de l'instruction du DOS [30] que l'obtention de vitesses plus rapides dans cet aquifère que dans l'Oxfordien apparaissait peu conforme aux connaissances. En effet, Linard et al. (2011) [139] concluent, sur la

⁵⁴ D'après la littérature, les porosités cinématiques généralement mesurées dans les calcaires sont autour de 5 % (1 à 10 %).

base des mesures hydrogéochimiques obtenues dans les forages de l'Andra, à des temps de résidence longs dans le Dogger et à des vitesses de transfert plus lentes dans ce dernier que dans l'Oxfordien. En outre, sur la base de son propre modèle hydrogéologique, également calé sur les valeurs de charges hydrauliques mesurées dans les forages de MHM (cf. Annexe T17), l'IRSN simule pour sa part des vitesses de transfert dans le Dogger de moins d'1 km / 100 000 ans, soit inférieures à celles d'environ 10 km / 100 000 ans qu'il simule pour l'Oxfordien. L'IRSN relève enfin que les écoulements simulés sont plus rapides dans la partie sud-ouest du modèle de l'Andra, zone où l'Andra retient une transmissivité du Dogger sous couverture de l'ordre de 10^{-4} m²/s, soit proche de celle retenue au niveau des affleurements. En l'absence de mesure hydrogéologique pour justifier cette transmissivité, l'Andra se base sur le très faible gradient hydraulique (0,03 %) existant entre le forage EST342 et le cours d'eau du Rognon, où le Dogger affleure et peut être drainé. L'IRSN estime pour sa part qu'au regard des connaissances sur la paléogéographie du Dogger [140], cette zone située au sud de la bande de « haut-fond » correspondrait à une sédimentation calcaire lagunaire (plateforme interne), de perméabilité généralement plus faible que les calcaires oolithiques ou récifaux rencontrés dans la ZT. Comme indiqué dans son expertise du DOS, **l'IRSN considère donc que la représentativité des valeurs de transmissivité retenues par l'Andra dans la zone sud-ouest du modèle n'est pas acquise.** En outre, l'Andra identifie un exutoire du Dogger dans la rivière Marne à environ 30 km au sud de la ZIOS, au-delà de la faille de Vittel, sans effet apparent de cette faille sur les trajectoires d'écoulements malgré l'épaisseur de cette zone de faille de dimension pluri-hectométrique, ce qui interroge l'IRSN. Dans le cadre de sa propre modélisation hydrogéologique, l'IRSN n'identifie pas d'exutoire local au Dogger.

Ainsi, l'IRSN considère que le paramétrage du modèle hydrogéologique retenu par l'Andra en termes de transmissivités du Dogger n'est toujours pas pleinement cohérent avec la connaissance du secteur de MHM. Ce modèle conduit à des vitesses d'écoulement plus élevées dans cet aquifère, qui peuvent être considérées comme *a priori* pénalisantes, mais qui pourraient conduire à une représentation erronée des directions d'écoulement, avec notamment l'apparition d'un exutoire local au sud. L'IRSN considère que la réalisation d'un forage au Dogger à quelques kilomètres au sud du forage EST342 pourrait contribuer à améliorer la représentativité du modèle hydrogéologique et à préciser la localisation des exutoires possibles des écoulements du site.

Enfin, s'agissant des temps de résidence des eaux dans les aquifères de l'Oxfordien et du Dogger, l'IRSN convient comme en 2017 que leur estimation basée sur l'utilisation de traceurs géochimiques est sujette à des incertitudes liées à leur période radioactive courte au regard de l'âge de ces eaux (¹⁴C) ou à la difficulté de discriminer plusieurs sources pour remonter à leur concentration initiale (³⁶Cl, ⁴He). L'IRSN rappelle que l'Andra dispose de données peu nombreuses pour être comparées aux estimations déduites des simulations numériques, notamment au niveau de la ZT. Malgré les difficultés rencontrées, l'acquisition de nouvelles données de traceurs isotopiques (³⁶Cl et ⁴He ainsi que suggéré par l'IRSN au stade du DOS) mériterait d'être poursuivie. En outre, d'autres indicateurs de temps de résidence comme l'¹²⁹I pourraient être explorés. Les connaissances qui pourraient en découler permettraient de consolider le modèle hydrogéologique. Aussi, l'IRSN encourage l'Andra à mettre en œuvre de telles méthodes d'estimation des temps de résidence des eaux dans l'Oxfordien et dans le Dogger, notamment via la campagne ZBS ainsi qu'elle le prévoit.

Au vu de l'ensemble de ces éléments, il appartiendra à l'Andra, dans une logique d'amélioration continue, de poursuivre le développement de ce modèle hydrogéologique sur lequel sont basées les évaluations de l'impact radiologique de Cigéo, en tenant compte des remarques précisées *supra* sur les propriétés géologiques et hydrogéologiques des formations de l'Oxfordien et du Dogger.

5.4.2.3. Modélisation numérique des écoulements souterrains « géoprospectifs »

Pour l'estimation de l'évolution des écoulements à long terme (modification des vitesses de transfert et de la localisation des exutoires), l'Andra s'appuie sur les connaissances des évolutions géoprospectives, examinées au chapitre 5.3 du présent rapport. Ces évaluations sont menées sur la base d'une évolution naturelle du climat et seront ultérieurement complétées par la prise en compte d'une évolution perturbée du climat.

Ainsi, les simulations « géoprospectives » des écoulements ont été réalisées à partir du modèle hydrogéologique présenté ci-dessus, dit « à l'actuel », modifié à l'instar du DOS selon les deux scénarios d'évolution géomorphologique définissant les taux d'érosion et d'incision à partir des cartes de surrection « réaliste » et « maximaliste » introduites au chapitre 5.3.1.

Avec le modèle d'évolution basé sur la carte de surrection « réaliste », les particules émises à la base de l'Oxfordien au droit de la ZIOS se dirigent toujours vers la zone nord des failles de la Marne (cf. résultats présentés en Annexe T15) mais les vitesses de transfert sont réduites de 10 % à 30 % par rapport à celles du modèle hydrogéologique « à l'actuel » du fait que la surrection tectonique tend à réduire le pendage des couches. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que la durée totale des évaluations de transfert de particules est usuellement limitée à un million d'années et que de ce fait, en tenant compte de transfert diffusifs estimés supérieurs à 600 000 ans au sein du COX, l'atteinte de la zone des failles de la Marne par les particules après transfert diffusif dans le COX puis convectif dans l'Oxfordien (supérieur à 500 000 ans dans ce modèle) n'est pas considérée comme effective. De ce fait, la zone des failles de la Marne, qui présente une transmissivité plus importante que le reste du secteur et pourrait permettre un pompage avec un débit suffisant pour exploiter l'aquifère, n'est pas retenue par l'Andra comme exutoire potentiel de l'Oxfordien dans le modèle basé sur une surrection « réaliste ». Pour le Dogger, les directions d'écoulement sont également similaires à celles obtenues avec le modèle « à l'actuel » (cf. Annexe T15) et les vitesses d'écoulement sont pour les mêmes raisons que l'Oxfordien réduites jusqu'à 10 % au droit de la ZT. Tout comme dans le modèle « à l'actuel », un exutoire naturel du Dogger est mis en évidence dans la vallée de la Marne au sud-ouest de la ZT.

Le modèle basé sur la carte de surrection « maximaliste », considéré comme enveloppe de l'évolution probable du secteur de MHM, conduit pour l'Oxfordien à des vitesses de transfert réduites de 25 %, ainsi qu'à l'apparition d'un exutoire dans la vallée de l'Ornain à 450 000 ans (cf. Annexe T15). Cet exutoire est retenu dans les évaluations de sûreté après fermeture, ce qui constitue une nouveauté par rapport aux situations retenues au stade du DOS. Pour le Dogger, ce scénario géoprospectif conduit à des vitesses de transfert inférieures à celles obtenues avec le modèle hydrogéologique « à l'actuel » et fait apparaître un second exutoire situé au niveau de la rivière du Rognon.

L'ensemble de ces éléments appelle les remarques suivantes de la part de l'IRSN.

L'IRSN constatait dans son expertise du DOS, comme rappelé au chapitre 5.3.1 du présent rapport, que les valeurs d'érosion et d'incision retenues dans les scénarios géoprospectifs conditionnent l'échéance de mise à l'affleurement de l'Oxfordien et ont donc un impact significatif sur les estimations des temps d'atteinte des exutoires locaux. En particulier, d'après le modèle d'évolution géodynamique basé sur une surrection « réaliste », les valeurs d'incision dans la vallée de l'Ornain au nord de la ZT, où la couverture du Kimméridgien ne présente plus localement qu'une épaisseur de l'ordre de la trentaine de mètres (autour de la ville de Ligny-en-Barrois, Figure 1), sont de 20-30 m pour le prochain million d'années. L'IRSN indiquait au stade du DOS qu'il apparaissait donc difficile, au regard des incertitudes existant sur ce paramètre et sur le modèle dit « réaliste » de surrection en général, de ne pas retenir que l'incision de l'Ornain atteindra l'Oxfordien d'ici un million d'années dans le modèle hydrogéologique géoprospectif associé. Ce constat reste d'actualité vis-à-vis de la modélisation présentée dans le DDAC. L'IRSN s'interroge en outre sur le bien-fondé de ne pas retenir la zone des failles de la Marne comme exutoire potentiel des particules dans le modèle basé sur une surrection « réaliste », simplement du fait d'une évaluation globale, considérant un transfert diffusif à travers le COX suivi d'un transfert convectif dans l'Oxfordien, limitée à 1 Ma. En effet, en raison des incertitudes générales inhérentes à l'établissement d'un modèle hydrogéologique, l'IRSN considère que cette zone pourrait également être considérée en tant qu'exutoire potentiel de type pompage, d'autant plus que dans le cadre de sa propre modélisation, l'IRSN observe ainsi qu'indiqué *supra* que les particules migrent à une vitesse supérieure à celle obtenue par l'Andra dans la modélisation « à l'actuel ». Aussi, comme dans son expertise du DOS, l'IRSN estime qu'un exutoire de type pompage au niveau des failles de la Marne devrait être retenu sur la base du modèle établi à partir de la carte de surrection « réaliste ».

L'IRSN note néanmoins que pour tenir compte des incertitudes associées aux différents modèles de surrection tectonique, et contrairement aux évaluations menées au stade du DOS, l'Andra retient un exutoire de l'Oxfordien au niveau des failles de la Marne ainsi que de l'exutoire au niveau de l'Ornain identifié avec le modèle basé sur une surrection « *maximaliste* » dans les évaluations de sûreté présentées dans le DDAC. **L'IRSN considère que la prise en compte de ces exutoires permet de tenir compte des incertitudes associées aux vitesses d'écoulement dans l'Oxfordien.** En outre, l'IRSN convient, ainsi qu'indiqué au chapitre 5.3.1, que ce modèle se base sur un modèle de surrection enveloppe et que **le scénario d'évolution géodynamique associé peut donc être considéré comme suffisamment pénalisant au niveau du secteur de MHM.** Les résultats des évaluations d'impact associées aux effets, sur les écoulements dans les encaissants, de la prise en compte des différents scénarios d'évolution géodynamique prospective du site de MHM sont analysés dans le cadre du GP3 relatif à la sûreté après fermeture.

6. PROPRIETES ET EVOLUTION DU COX

Les éléments présentés par l'Andra dans le DDAC relatifs aux propriétés du Callovo-Oxfordien et à leurs évolutions liées aux perturbations induites par l'implantation d'un stockage, dues notamment au creusement et aux interactions avec les composants ouvragés, constituent des données de base à l'étude du comportement des ouvrages suite au creusement de l'installation souterraine et à celle de la capacité de confinement du milieu géologique. Les propriétés de transfert dans le COX sain ainsi que les effets des perturbations liées aux transitoires hydraulique-gaz, géomécanique et chimique sur ces propriétés sont examinés ci-après. Ce chapitre présente également l'analyse par l'IRSN des propriétés du matériau de remblai envisagé par l'Andra, principalement constitué d'argilites du COX excavé.

6.1. Transferts dans le COX sain

La capacité du COX à confiner les radionucléides et les substances toxiques chimiques relâchés par les déchets est liée d'une part, aux propriétés hydrodynamiques de ce milieu géologique et d'autre part, aux propriétés chimiques d'insolubilisation (limites de solubilité) et de sorption de ces espèces, qui caractérisent leur transfert vers les formations encaissantes.

6.1.1. Processus et paramètres hydrodynamiques

Les processus de transport hydrodynamique dans le COX regroupent l'ensemble des processus macroscopiques liant les flux de fluides, de solutés et de chaleur aux gradients de potentiel hydraulique, chimique et thermique. L'équation de transport en milieux poreux utilisée par l'Andra dans ses calculs en support à l'évaluation de la sûreté de Cigéo tient compte des processus de convection, de diffusion et de dispersion hydrodynamique [82]. Elle intègre à la fois :

- les paramètres diffusifs tels que le coefficient de diffusion effectif (D_e) et la porosité accessible aux radionucléides (ω_{acc}),
- les paramètres convectifs, tels que la porosité cinématique ou porosité accessible à l'écoulement (ω_{cin}), la conductivité hydraulique (K) et le gradient de charge hydraulique ($gradH$),
- la dispersion hydrodynamique, qui est fonction des paramètres diffusifs et convectifs, ainsi que de la dispersivité (α).

Coefficient de diffusion effectif

Le processus de diffusion au sein du COX non perturbé a été analysé par l'IRSN par le passé, notamment au cours de l'instruction du Dossier 2005 [9] et du DOS de Cigéo [30]. Au stade du DOS, l'IRSN estimait que les coefficients de diffusion effectifs (D_e) retenus pour les situations « *de référence* » et « *enveloppe* », qui décrivent les évolutions possibles du système de stockage après sa fermeture en vue de l'évaluation de sûreté pendant cette phase, traduisaient bien l'état des connaissances. Depuis, seule la valeur du D_e de l'uranium retenue par l'Andra dans le DDAC a été modifiée, de $4,4 \cdot 10^{-12}$ m/s [142] à $4,0 \cdot 10^{-12}$ m/s [143], sur la base de résultats expérimentaux [82] et en considérant que l'uranium serait majoritairement présent sous la forme d'une espèce neutre de complexes carbonatés d'uranyle. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Par ailleurs, certains scénarios d'évolution altérée (**SEA**)⁴⁵ (cf. chapitre 5.3.1) pris en compte par l'Andra dans l'évaluation de sûreté du stockage décrivent le relâchement en phase thermique de tout ou partie de l'inventaire HA0 ou HA1/2 [48] ; l'Andra tient compte dans ces scénarios de l'effet de la température en corrigeant les valeurs de D_e , ce qui conduit à une accélération du transfert des espèces relâchées par le stockage dans les simulations correspondantes. Ces scénarios considèrent une augmentation de la température maximale entre 10 et 15 ans après la mise en place des colis HA, de l'ordre de 80°C en paroi des alvéoles HA et de 40°C à 50°C à environ 25 m des alvéoles. Pour corriger les D_e , l'Andra retient une loi de type Stokes-Einstein [144] basée sur la dépendance de la viscosité de l'eau à la température, plutôt qu'une loi de type Arrhenius qui demande l'acquisition des

valeurs de l'énergie d'activation [145]. Cette correction appliquée par l'Andra pendant la phase thermique conduit à augmenter les D_e d'un facteur 2 à 4 pendant quelques milliers d'années. L'IRSN observe que l'étude [144] sur laquelle s'appuie l'Andra souligne certaines faiblesses liées au choix d'une loi de Stokes-Einstein, notamment concernant la diffusion des cations fortement sorbés ($^{22}\text{Na}^+$ et $^{137}\text{Cs}^+$). A l'inverse, l'étude [145] a montré que la loi de type Arrhenius est vérifiée en température y compris pour les cations étudiés. Au vu des limites soulignées par l'étude précitée, **l'IRSN estime que la correction des valeurs de D_e liées à la température pour les espèces cationiques est acceptable en première approche, mais que l'Andra pourrait conduire des travaux de recherche complémentaires, basés sur les argilites du COX, afin de conforter son évaluation de sûreté après fermeture.** Les conséquences de cette incertitude sont évaluées dans le cadre du GP3 relatif à l'évaluation de sûreté après fermeture du stockage.

Porosité cinématique

La porosité cinématique, qui correspond à une partie de la porosité totale, traduit la porosité accessible à l'eau mobile (ou eau libre⁵⁵) et permet le calcul de la vitesse moyenne de l'eau en divisant la vitesse de Darcy par la porosité cinématique. Aussi, plus faible sera la porosité cinématique, plus grande sera la vitesse moyenne de l'eau et le transport des espèces dissoutes sera donc accéléré. L'Andra s'était engagée, à l'issue de l'examen du DOS [30], à justifier dans le DDAC les valeurs de porosité cinématique « *de référence* » et « *enveloppe* » retenues pour l'évaluation de sûreté, sur la base d'une analyse des incertitudes s'appuyant sur l'ensemble des mesures expérimentales.

Au stade du DDAC, l'Andra s'appuie, pour évaluer la porosité cinématique, sur des essais de percolation et de diffusion sur des échantillons provenant de différents niveaux d'argilites du COX [146]. Ces essais mettent en évidence que la porosité cinématique des argilites, aussi bien dans l'UA que dans l'USC, est comprise entre 7 % et 11 % (soit 40 à 60 % de la porosité totale, d'une valeur moyenne de 18 % ; les valeurs les plus élevées étant situées dans l'USC). Ces valeurs de porosité cinématique sont cohérentes avec une quantité d'eau libre estimée à 50 % de l'eau totale dans les argilites, du fait de la présence des minéraux argileux et de la forte compacité de la roche [82]. Sur la base de ces essais, l'Andra retient des valeurs de porosité cinématique, respectivement « *de référence* » et « *enveloppe* », de 50 % et 40 % de la porosité totale [82].

L'IRSN estime que les essais effectués par l'Andra sur échantillons du COX ont été correctement menés et conduisent à des estimations utiles de la porosité cinématique. L'IRSN a de plus évalué ces résultats par comparaison avec une méthode indirecte mais représentative de l'échelle d'un site, mise en œuvre sur l'argile à Opalines du Mont-Terri [148], via une estimation de la quantité d'eau mobilisée lors de déformations journalières provoquées par les variations cycliques des marées terrestres, qui peuvent être observées dans les signaux de pression de pore. L'IRSN estime en effet que cette méthode permet de disposer d'une estimation plus pertinente de la porosité cinématique puisque représentative de l'échelle de la formation géologique. Les résultats obtenus pour les argiles du Mont-Terri, dont la porosité et la microstructure sont comparables à celles du COX, montrent des valeurs de porosité cinématique comprises entre 50 et 90 % de la porosité totale. A cet égard, l'IRSN relève que la valeur « *de référence* » de 50 % retenue par l'Andra pour le COX correspond à la valeur basse des résultats obtenus au Mont-Terri et estime que la valeur « *enveloppe* » de 40 % semble plus cohérente avec les valeurs mesurées au Mont-Terri que celle de 25 % retenue par l'Andra au stade du DOS. **L'IRSN convient ainsi que les valeurs de porosité cinématique « *de référence* » et « *enveloppe* » retenues par l'Andra sont pertinentes au regard des connaissances scientifiques.**

Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux menés par l'Andra en conditions *in situ*, dans les forages de reconnaissance géologique et dans le LSMHM, et en laboratoire à partir d'échantillons d'argilites collectés en forages [149]. Au stade du DOS, l'IRSN relevait que les valeurs de conductivité hydraulique retenues ne tenaient pas compte de l'anisotropie des couches argileuses ; l'Andra s'était alors engagée, comme

⁵⁵ Au sein de la porosité, l'eau "liée" est une partie de l'eau souterraine qui est physiquement ou chimiquement retenue par le solide rocheux. Ainsi, seule l'eau "libre" est mobilisable par gradient de pression.

pour la porosité cinématique (cf. *supra*), à justifier dans le DDAC les valeurs de conductivité hydraulique sur la base de l'ensemble des données expérimentales disponibles.

Au stade du DDAC, l'Andra a retenu 252 mesures de conductivité hydraulique acquises dans le plan de la stratification sur échantillons et par tests hydrauliques. Le Tableau 7 résume l'évolution des valeurs de conductivité hydraulique horizontales K_h et verticales K_v retenues par l'Andra pour le COX « en grand » (échelle du site) entre le DOS [142] et le DDAC [143]. Les valeurs retenues par l'Andra pour le DDAC ont été estimées par approche probabiliste⁵⁶ et corrigées de l'anisotropie pour la conductivité verticale, en divisant la conductivité hydraulique horizontale par 3 eu égard à un écoulement privilégié dans le plan de la stratification [149]. Ces valeurs ont été comparées à celles issues d'une étude statistique classique⁵⁷.

	Valeurs retenues dans le DOS		Valeurs retenues dans le DDAC (étude probabiliste)		Etude statistique dans le DDAC	
	K_v	K_h	K_v	K_h	$K_v (=K_h/3)$	K_h
Situation référence	$K_v = K_h = 4.10^{-14}$ m/s		7.10^{-14} m/s	2.10^{-13} m/s	$\approx 1.10^{-13}$ m/s	$3,3.10^{-13}$ m/s
Situation enveloppe	2.10^{-13} m/s	3.10^{-13} m/s	1.10^{-13} m/s	3.10^{-13} m/s	$\approx 9.10^{-13}$ m/s	$2,6.10^{-12}$ m/s

Tableau 7. Valeurs de conductivité hydraulique verticale (K_v) et horizontale (K_h) du COX en grand retenues par l'Andra aux stades du DOS et du DDAC et valeurs issues de l'étude statistique fournie au stade du DDAC [149].

L'IRSN relève que le facteur d'anisotropie de 3 retenu par l'Andra est cohérent avec les connaissances acquises sur d'autres sites argileux ([150] pour Tournemire et [151] pour le Mont-Terri). En outre, l'IRSN observe que les valeurs de référence retenues au stade du DDAC sont globalement plus conservatives que celles proposées au stade du DOS et que l'approche probabiliste retenue conduit à des valeurs de K_h proches de celles obtenues par l'approche statistique classique dans le cas de la situation de référence. Néanmoins, cette approche probabiliste conduit à des valeurs sensiblement différentes de celles obtenues par l'approche statistique pour la situation enveloppe (cf. Tableau 7). L'IRSN relève que les valeurs enveloppes obtenues par l'approche statistique classique sont plus conformes aux résultats des essais hydrauliques *in situ* (10^{-14} m/s < K < 10^{-12} m/s) [152][153][154] et par conséquent plus représentatives de la formation en grand du COX que celles obtenues sur échantillons. **Aussi, l'IRSN considère que l'approche probabiliste retenue par l'Andra pour son évaluation des valeurs de conductivité hydraulique du COX n'est pas suffisamment prudente, en particulier pour retenir la valeur enveloppe, ce d'autant plus que la ZIOS n'a encore fait l'objet d'aucun test hydraulique.**

A cet égard, l'IRSN constate sur la base de ses propres calculs qu'une modification de la valeur de conductivité hydraulique du COX d'un ordre de grandeur (10^{-13} m/s à 10^{-12} m/s) en situation d'évolution normale (SEN⁴⁵) conduit à une augmentation du pic maximal de débit molaire en sortie de la roche hôte avec une occurrence plus précoce. **Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra évaluer la sensibilité de la performance globale du système de stockage à une valeur de conductivité hydraulique plus enveloppe des mesures réalisées.** Ce point est repris dans la conclusion ci-dessous.

⁵⁶ Etude statistique basée sur une modélisation 2D du flux d'eau généré par un champ de perméabilité du COX issu d'un tirage aléatoire par maille élémentaire (1m x 1m).

⁵⁷ Approche utilisant la moyenne géométrique et l'écart-type des mesures retenues.

Le gradient de charge hydraulique

La différence de charge hydraulique entre les aquifères encaissants du COX (Oxfordien carbonaté et Dogger) génère un gradient vertical d'écoulement à travers la formation hôte (cf. Annexe T16). L'Andra indique que ce gradient est très faible au niveau de la ZIOS, avec une valeur ascendante dans sa partie nord (jusqu'à 0,08 m/m au niveau du quartier de stockage HA) et descendante dans sa partie sud (jusqu'à -0,02 m/m au niveau du quartier de stockage MA-VL) [48]. **Ces éléments n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

L'Andra observe toutefois l'existence, dans la couche argileuse du COX, d'une surcharge hydraulique par rapport au gradient hydrostatique établi par ses encaissants aquifères, d'une valeur maximale d'environ 50 m (en équivalent hauteur d'eau) (cf. Figure 23). Cette surcharge équivaut à une surpression au sein du COX d'une valeur mesurée atteignant 0,5 MPa au niveau du LSMHM [147].

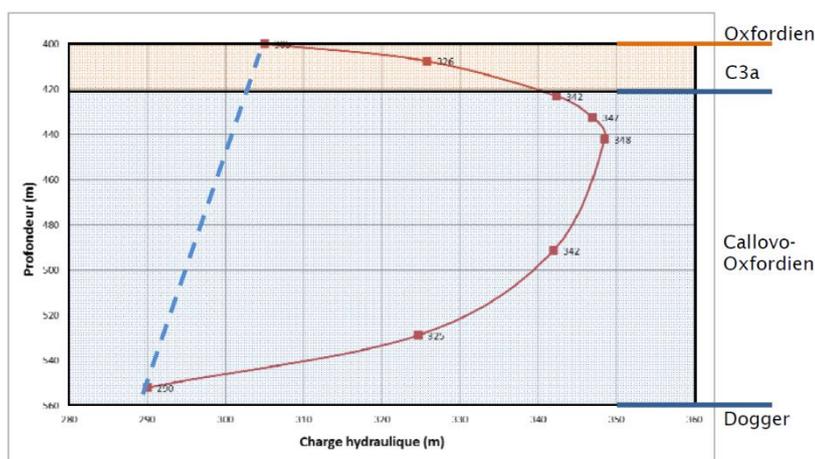


Figure 23. Profil vertical des charges hydrauliques mesurées dans le COX au niveau du LSMHM (en rouge) et profil vertical sans surpression déduit des charges mesurées dans l'Oxfordien et le Dogger (en bleu) [81].

Selon l'Andra, cette surcharge est en accord avec le comportement des traceurs naturels qui suggère un transport diffusif dominant, ce dont l'IRSN convient. L'Andra privilégie, comme au stade du DOS, des causes chémo-hydro-mécaniques pour expliquer cette surpression, notamment via la pression de disjonction⁵⁸ qui n'est pas connue pour engendrer des flux d'eau. Sur cette base, l'Andra ne tient pas compte des profils de surcharges mesurées dans le COX pour définir les scénarios (SEN, SEA) en support à son évaluation de sûreté ; elle évalue toutefois son influence hydraulique potentielle sur les transferts de radionucléides au travers du COX dans le cadre d'une étude de sensibilité [48].

L'IRSN observe que d'après [155], la pression de disjonction ne peut être estimée qu'à 0,1 MPa au maximum, soit très en deçà de la surpression de 0,5 MPa mesurée au centre du COX, et qu'elle ne peut donc en être la cause principale. L'IRSN relève en outre d'après [156] et [157] que la surpression peut être globalement expliquée, au moins dans la partie supérieure du COX, par des processus osmotiques, générateurs de flux d'eau. A cet égard, l'IRSN a, pour sa part, montré que les causes osmotiques sont pertinentes pour expliquer les surpressions mesurées dans les roches argileuses de Tournemire et du Mont-Terri, avec des valeurs respectives de 0,3 MPa [158] et de 1,3 MPa [159].

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que plusieurs actions sont en cours ou à venir pour déterminer l'origine de la surpression observée dans le COX, notamment une thèse démarrée en 2022 sur les processus chémo-thermo-osmotiques ainsi que de nouvelles mesures de pression lors de la future campagne de forages

⁵⁸ La pression de disjonction est définie comme la différence de pression entre un film de fluide présent entre deux particules de minéraux argileux et la pression d'équilibre du fluide [155]. Elle a pour effet de maintenir écartées les surfaces chargées négativement des minéraux argileux et donc un espace poral. La pression de gonflement représenterait la moyenne macroscopique de la pression de disjonction.

ZBS. L'IRSN considère que ces recherches pourraient inclure un programme visant à acquérir l'ensemble des paramètres nécessaires aux calculs des flux couplés incluant les causes chémo-osmotiques.

En outre, l'IRSN souligne que selon l'origine de la surpression mesurée dans le COX, celle-ci peut générer des flux d'eau (induits par des phénomènes osmotiques) ou non (causes chémo-hydro-mécaniques). **Aussi, l'IRSN estime, comme lors des précédentes instructions, qu'en l'absence d'explication convaincante sur son origine, il est nécessaire d'étudier l'influence du flux d'eau maximal que pourraient générer cette surpression sur le transport des radionucléides au sein du COX.**

Par ailleurs, dans le cas d'une surpression d'origine hydraulique, la conductivité hydraulique du milieu est connue pour impacter le temps de retour à la pression d'équilibre des charges (*i.e.* sans surpression) au sein des roches argileuses [160]. A cet égard, des observations précitées réalisées au Mont-Terri, l'IRSN note que le maximum de surpression est mesuré dans l'un des deux faciès argileux les plus proches du COX en termes de propriétés minéralogiques et pétrophysiques, caractérisés par une conductivité hydraulique autour de 10^{-12} m/s et proche de la gamme haute des valeurs mesurées dans le COX [148][159]. **Aussi, l'IRSN estime que la mesure d'une surpression de 0,5 MPa au sein du COX pourrait être compatible avec le fait de considérer une valeur enveloppe de conductivité hydraulique à 10^{-12} m/s.** A cet égard, l'IRSN estime que la seule analyse de sensibilité à une surpression d'origine hydraulique réalisée par l'Andra pour le DDAC, qui ne prend pas en compte la gamme possible des conductivités hydrauliques mesurées, ne permet pas d'évaluer pleinement l'effet de l'incertitude associée.

En conclusion, l'IRSN considère qu'il est nécessaire d'évaluer l'effet hydraulique pouvant être induit par la surpression dans les évaluations de sûreté après fermeture, notamment pour les scénarios considérant un court-circuit hydraulique de la roche hôte (telles que les situations de faille traversante ou d'intrusion humaine involontaire) au travers desquels l'effet d'une surpression serait le plus important. **Par conséquent, l'IRSN estime que l'Andra devra réaliser, pour l'instruction relative au GP3, une étude de sensibilité de la performance globale du système de stockage à, simultanément, (i) la conductivité hydraulique enveloppe du COX déduite de l'analyse statistique des mesures et (ii) un gradient hydraulique vertical tenant compte d'une surpression d'origine hydraulique. Cette étude prendra notamment en compte les cas de court-circuit hydraulique de la roche hôte.** Par lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 (cf. Annexe A2), l'Andra a formulé l'[engagement 2024-E10](#). L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant. Ceci est analysé dans le cadre du GP3 relatif à la sûreté après fermeture du stockage.

6.1.2. Processus et paramètres chimiques

Deux processus majeurs pilotent le confinement chimique des radionucléides et des substances toxiques chimiques au sein du COX : les processus de précipitation/dissolution, qui modifient les phases solides existantes, et les processus de sorption, qui sont des phénomènes de surface par lesquels des molécules se fixent à la surface du solide ou s'en détachent. Ces processus sont respectivement pris en compte dans les évaluations de sûreté par la limite de solubilité (C_{sat}) et le coefficient de partage (K_d). Afin d'évaluer la concentration en solution des radionucléides et des substances toxiques chimiques, l'Andra calcule, par modélisation thermodynamique, les limites de solubilités (C_{sat}) en imposant la composition chimique de l'eau porale du COX [82]. Pour évaluer la rétention par échanges solide/solution, l'Andra utilise principalement le modèle de K_d linéaire⁵⁹, dont les valeurs sont obtenues expérimentalement ou recalculées à partir de modèles empiriques. En outre, l'Andra effectue, pour ces deux processus, des analogies pour certains éléments appartenant à la même famille chimique. Enfin, l'Andra détermine pour ces deux paramètres une valeur de référence bornée par une valeur minimale et une valeur maximale, afin d'établir les situations de référence et enveloppe des scénarios considérés dans l'évaluation de sûreté à long terme du stockage ; les valeurs de K_d minimales et de C_{sat} maximales des différents solutés sont appliquées dans la situation enveloppe.

⁵⁹ L'adsorption du Rb et du Cs est représentée par un modèle de Langmuir.

L'IRSN souligne le travail de qualité fourni par l'Andra depuis le Dossier 2005 [9] et restitué dans le référentiel [82] concernant la caractérisation des paramètres de rétention des solutés dans le COX sain. Aussi, sur la base des éléments présentés au stade du DDAC, l'IRSN estime que les gammes de valeurs retenues par l'Andra pour l'évaluation de sûreté après fermeture sont globalement bien représentatives du niveau des connaissances actuelles concernant la solubilité et l'adsorption des solutés dans la roche hôte. Toutefois, l'IRSN relève, parmi les radionucléides et toxiques chimiques dont les valeurs de K_d et de C_{sat} ont été révisées depuis le DOS, les points ci-dessous portant sur la représentativité des valeurs de K_d de l'uranium (U) et des valeurs de solubilité du zirconium (Zr), ainsi que sur le cas du sélénium (Se) qui fait l'objet de l'engagement E10-2017 pris par l'Andra à l'issue de l'instruction du DOS.

S'agissant de la valeur de K_d de l'uranium, la valeur minimale retenue par l'Andra au stade du DDAC ($5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$) a diminué d'un facteur 20 depuis le DOS, sur la base de mesures récentes de rétention de l'U (+VI) dans les argilites du COX [161], alors que la valeur retenue au stade du DOS était basée sur des mesures dans les argiles à Opalines. L'IRSN constate que cette nouvelle valeur est cohérente avec d'autres mesures réalisées dans le cadre d'études plus récentes [162][163]. S'agissant de la spéciation de l'uranium, la prédominance du complexe $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$ (U (+VI)) dans des conditions représentatives de l'eau porale du COX a été évaluée par l'Andra sur la base de données expérimentales et thermodynamiques [171]. Cependant, l'uranium étant sensible au redox, une fraction d'uranium existe également sous la forme (+IV), qui présente une capacité de rétention supérieure à U (+VI). Aussi, l'Andra retient une valeur de K_d de référence pour l'uranium de $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ [171]. **L'IRSN estime que les valeurs minimale et de référence retenues sont confortés par une littérature scientifique solide sur le comportement de l'uranium dans le milieu argileux du COX**, mais relève que des incertitudes demeurent, sur la spéciation des espèces U(+IV)/U(+VI) liée à la constante d'hydrolyse de U (+IV) ainsi que sur l'existence de certains complexes carbonatés aqueux. A cet égard, l'IRSN prend note que l'Andra poursuit des études expérimentales *in situ* sur le comportement de l'uranium, en particulier via l'expérience DRN au LSMHM [81], et que les résultats de cet essai seront pris en compte pour établir son programme de recherche relatif à la sorption de l'uranium au cours de la phase industrielle pilote [164], **ce qui est satisfaisant.**

S'agissant de la limite de solubilité du zirconium, la valeur haute retenue par l'Andra a évolué de $9 \cdot 10^{-7} \text{ M}$ à 10^{-7} M depuis le DOS, et correspond à la concentration de zirconium mesurée dans les eaux interstitielle du COX. Or, l'IRSN note que des incertitudes persistent [82], liées à la variabilité de la concentration du Zr dans les eaux du COX et à la stabilité du complexe qu'il forme avec les carbonates, qui ne peut faire l'objet d'une évaluation par modélisation en raison de l'absence de données thermodynamiques disponibles. **Aussi, l'IRSN considère que la valeur précédemment définie au stade du DOS permettait de mieux couvrir ces incertitudes et suggère que l'Andra poursuive une veille de connaissances permettant d'affiner la valeur enveloppe de la limite de solubilité du zirconium.**

S'agissant enfin de la spéciation chimique du sélénium, ce radionucléide est généralement considéré comme prépondérant dans les évaluations de sûreté des stockages géologiques en milieu argileux, en raison de sa période radioactive importante (377 000 ans) et de sa forme anionique, réputée mobile, pour les états d'oxydation (+VI), (+IV) et (-II). Au stade du DOS, l'IRSN estimait que l'impact radiologique dû au ^{79}Se était potentiellement sous-estimé [30]. En effet, l'Andra indiquait à ce stade que le sélénium était présent dans les verres sous les degrés d'oxydation (0) et (+IV) (sélénite SeO_3^{2-}). Toutefois, l'IRSN relevait que le sélénium était également présent dans les déchets vitrifiés sous la forme d'ion sélénate (SeO_4^{2-}) de degré d'oxydation (+VI), qui est une espèce plus mobile et soluble dans les argiles que les formes chimiques de degré d'oxydation inférieur. Aussi, l'Andra s'était engagée à préciser, à l'échéance du DDAC, la spéciation chimique du sélénium dans les colis de stockage ainsi que dans la roche hôte.

Au stade du DDAC, la spéciation chimique du sélénium dans les colis HA et MA-VL vitrifiés retenue par l'Andra [165] est définie sur la base de travaux relatifs à la spéciation du sélénium dans les verres. Ainsi, l'évaluation de la proportion de sélénium au degré d'oxydation (+VI) par rapport au sélénium total dans les verres de produits de fission borosilicatés élaborés à la Hague a conduit l'Andra à retenir :

- une valeur enveloppe de 20 % de Se (+VI), à partir des données de la littérature, notamment sur la base d'une modélisation sur les verres borosilicatés américain SRL-131 [166],
- une valeur de référence voisine de 3 % de Se (+VI), à partir des données acquises expérimentalement sur des verres simplifiés inactifs [167].

L'IRSN constate en premier lieu qu'un nombre relativement limité d'études fournissent des données quantitatives sur les degrés d'oxydation probables du sélénium dans les verres borosilicatés. Celles-ci confirment que le sélénium se trouve principalement sous la forme (+IV) dans les matrices vitreuses [e.g. [168]] et que la spéciation sous la forme SeO_3^{2-} est une bonne approximation de l'état chimique du sélénium dans ces matrices. Néanmoins, l'IRSN relève que, dans ces études, les effets de l'irradiation des produits de fission et des actinides sur la spéciation du sélénium ne sont pas quantifiables et par conséquent non pris en compte.

S'agissant de la proportion de sélénium au degré d'oxydation (+VI), **la valeur enveloppe retenue par l'Andra n'appelle pas de commentaire particulier de l'IRSN**. Pour ce qui concerne la valeur de référence, l'IRSN note que, dans l'étude expérimentale sur les verres simplifiés inactifs en présence de sélénium et de palladium [167], le tellure n'est pas pris en compte. Or, le tellure, comme le sélénium, forme des particules métalliques avec le palladium au sein des verres [169][170]. Aussi, l'absence de tellure pourrait favoriser l'intégration du sélénium au sein de ces particules métalliques (Se(0)) au détriment du sélénium dans la matrice vitreuse (Se (+IV) et (+VI)), d'autant plus que la quantité de tellure dans un combustible usé avant retraitement est environ dix fois supérieure à celle du sélénium. Par ailleurs, les quantités de Se et de Pd introduites lors de l'élaboration des verres inactifs ne sont pas cohérentes avec la proportion respective de ces produits de fission généralement observée dans un combustible usé. **Aussi, l'IRSN estime que la valeur de 3 % de sélénium à l'état (+VI) retenue par l'Andra comme valeur de référence dans les verres HA pourrait être sous-estimée.**

S'agissant des déchets MA-VL non vitrifiés, l'Andra postule que 100 % de l'inventaire en sélénium se trouve sous la forme soluble Se(+VI) [172] pour les situations de référence et enveloppe, au regard des connaissances acquises et des incertitudes résiduelles. **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

S'agissant enfin de la spéciation du sélénium dans le COX, l'Andra indique que le Se (+VI) est stable malgré les conditions réductrices du milieu [82]. *A contrario*, le Se (+IV) peut évoluer vers des états plus réduits (Se(0), Se(-I) ou Se(-II)), du fait des conditions réductrices du milieu mais également par réactions avec la matière organique ou sur des phases solides contenant du fer [173]. Sur la base d'une modélisation thermodynamique, l'Andra montre ainsi que la solubilité maximale du sélénium dans le COX considérée dans la situation enveloppe est pilotée par le solide FeSe (-II) et évaluée à 10^{-6} M, **ce qui n'appelle pas de remarque de l'IRSN**. S'agissant de la solubilité de référence du sélénium, la valeur retenue par l'Andra est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-9}$ M, le sélénium sous la forme HSe^- (-II) en solution étant contrôlé par Se(0) [82]. L'IRSN relève ainsi que cette valeur est faible par rapport à la concentration du sélénium mesurée dans les eaux du COX ($[\text{Se}]_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-7}$ M [82]). L'IRSN prend note que l'Andra mène des études [135] afin de mieux définir la concentration, la spéciation et les phases solides de sélénium dans les conditions *in situ* et, ainsi qu'indiqué au cours de l'instruction, elle réalisera « *la mise à jour de l'argumentaire autour de la solubilité du sélénium au sein des argilites du COX à l'état naturel* » et « *reprécisera les justifications des valeurs de référence et enveloppe* ». **Compte tenu de l'importance de ces connaissances pour l'évaluation d'impact de Cigéo, l'IRSN encourage vivement l'Andra en ce sens.**

6.2. Effets du transitoire hydraulique-gaz sur les propriétés du COX

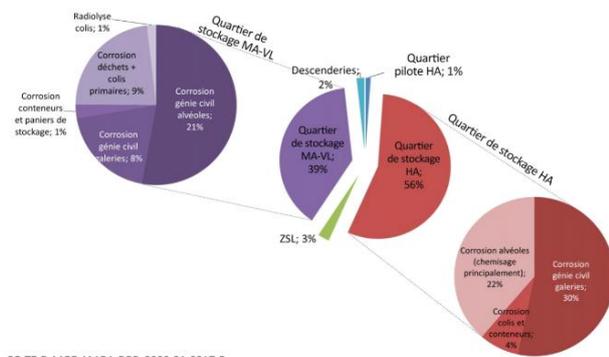
Le transitoire hydraulique-gaz [174] est un ensemble de phénomènes couplés qui se produisent sur plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années après la fermeture du stockage. Il résulte de la resaturation des ouvrages souterrains par les eaux du COX et de la production d'une quantité importante de gaz. L'Andra précise qu'il s'agit principalement d'hydrogène, issu de la corrosion des métaux présents dans le stockage ainsi que, dans une moindre mesure, de la radiolyse de déchets organiques de type MA-VL. Au début de ce transitoire, les gaz produits se dissolvent dans l'eau du COX et migrent dans la roche par diffusion sous forme de soluté. Puis, lorsque l'eau du COX est saturée en gaz, il se forme une phase gazeuse qui monte en pression, ce qui ralentit la

resaturation du stockage. La description complète de ce transitoire repose sur la simulation numérique et nécessite l'utilisation de modèles diphasiques liquide-gaz. L'un des enjeux majeurs identifié par l'Andra est de veiller à ce que pendant toute la durée de ce transitoire, la pression de gaz n'atteigne pas une valeur qui conduise à fracturer « en grand » (i.e. sur toute la hauteur) le COX. Un autre enjeu est de veiller à ce que la pression de gaz n'accélère pas le transfert des radionucléides en les poussant le long des ouvrages d'accès de l'installation souterraine (effet piston).

Dans ce qui suit, le chapitre 6.2.1 présente les principaux résultats de la simulation numérique dite « de base » réalisée par l'Andra, sans commentaires de la part de l'IRSN, dans le seul but d'illustrer les principaux mécanismes mis en jeu et les ordres de grandeur en question. Le chapitre 6.2.2 évalue ensuite les différents éléments relatifs au « terme source gaz » présentés par l'Andra. Pour évaluer le risque de fracturation « en grand » du COX, il est nécessaire de définir un « seuil de fracturation » au-delà duquel ce risque existe et qui est l'objet du chapitre 6.2.3. L'évaluation par l'Andra de la pression maximale de gaz dans le stockage est ensuite examinée au chapitre 6.2.4. Enfin, le chapitre 6.2.5 concerne les éléments relatifs au risque d'effet piston.

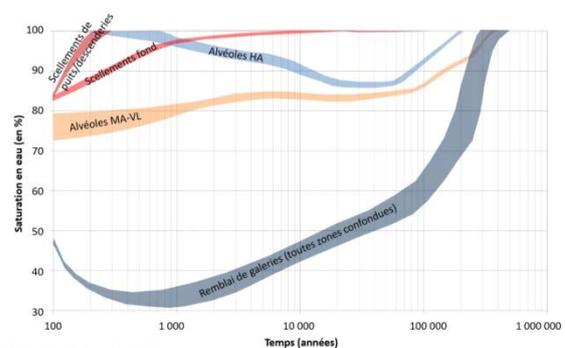
6.2.1. Principaux résultats de la simulation du transitoire hydraulique-gaz à l'échelle du stockage

Les principaux résultats obtenus par l'Andra concernant le transfert de gaz à l'échelle du stockage, avec un jeu de paramètres dit « de base », c'est-à-dire dont toutes les valeurs sont choisies égales à des valeurs médianes lorsqu'il s'agit de mesures ou égales à des valeurs spécifiées lorsqu'il s'agit de choix de conception, sont illustrés par les Figure 24 à Figure 28 ci-dessous. La Figure 24 montre que le gaz produit dans l'installation souterraine provient principalement des quartiers de stockage HA (56 %) et MA-VL (39 %) et que la part du génie civil n'est pas négligeable. Ce gaz provient de la corrosion des aciers présents dans le stockage et du ferrailage des bétons. La Figure 25 montre que les durées nécessaires à l'atteinte d'une saturation totale en eau des différents composants du stockage sont très variables et influencées par la production de gaz : dans le quartier MA-VL, cette durée est de l'ordre de 500 000 ans pour les galeries et de 300 000 ans pour les alvéoles de stockage MA-VL. Dans les quartiers HA, ces durées sont de l'ordre de 300 000 ans pour les galeries et de 200 000 ans pour les alvéoles. Pour les noyaux de scellement de fond, le degré de saturation en eau dépasse 95 % en moins de 1 000 ans du fait des propriétés capillaires à succions élevées qui caractérisent la bentonite. Cette resaturation est encore plus rapide pour les scellements de liaison surface-fond dont la partie supérieure est resaturée en quelques dizaines d'années par les eaux de l'Oxfordien calcaire. Enfin, concernant le COX sain, l'Andra précise que du fait de sa pression d'entrée de gaz élevée et de sa très faible perméabilité, le gaz ne désature pas ce matériau mais reste dans les composants ouvragés et migre vers les LSF par les galeries. La Figure 25 montre également que les alvéoles HA sont une première fois saturés en eau entre 400 et 500 ans, avant d'être désaturés par la production de gaz puis de se resaturer pour atteindre une nouvelle saturation totale en eau vers 200 000 ans ; de tels cycles de désaturation-resaturation apparaissent aussi pour les remblais et méritent d'être soulignés car ils peuvent s'accompagner de phénomènes d'hystérésis mentionnés au chapitre 6.2.4.



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-21-0017-B

Figure 24. Origine des quantités de gaz produit dans le stockage [174].



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-19-3689-C

Figure 25. Évolution de la saturation en eau des principaux composants de l'installation souterraine [174].

La Figure 26 montre que la pression maximale de gaz atteint 7 à 7,5 MPa vers 20 000 à 30 000 ans dans le quartier MA-VL. Un autre pic de pression, moins élevé, apparaît vers 100 ans dans les quartiers HA ; l’Andra l’explique par le dégagement de chaleur des colis HA (cf. Figure 27) qui provoque l’apparition d’une surpression hydraulique entre les alvéoles et accélère la resaturation du quartier, provoquant ainsi ce premier pic ; il s’atténue lorsque la puissance thermique des colis diminue. Ce phénomène est également indiqué au chapitre 6.3 du présent rapport relatif aux couplages THM.

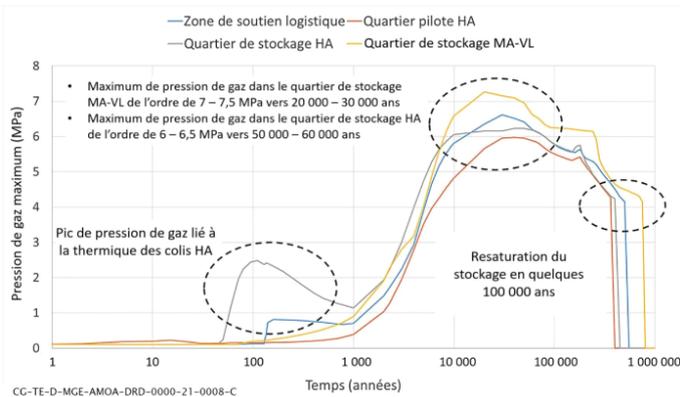


Fig.3

Figure 26. Évolution des pressions maximales de gaz dans différentes zones de l’installation souterraine [174].

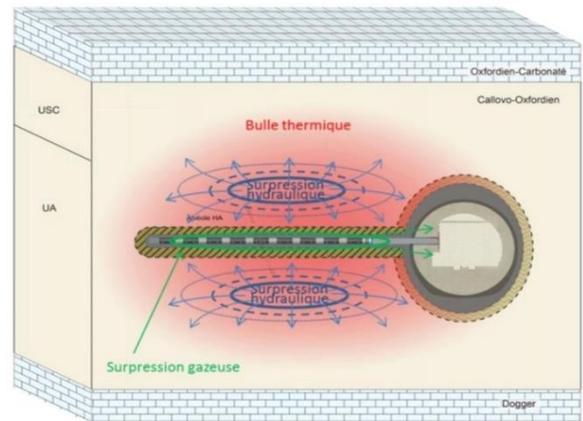


Figure 27. Couplages thermique et hydraulique-gaz autour d’un alvéole HA [174].

Enfin, la Figure 28 montre que, sur la totalité du gaz produit en un million d’années, environ 30 % atteint l’Oxfordien calcaire en passant sous forme gazeuse par les LSF (principalement les puits) tandis que le reste migre par diffusion sous forme dissoute dans les eaux du COX, à parts quasi égales vers les encaissants supérieur (Oxfordien calcaire) et inférieur (Dogger).

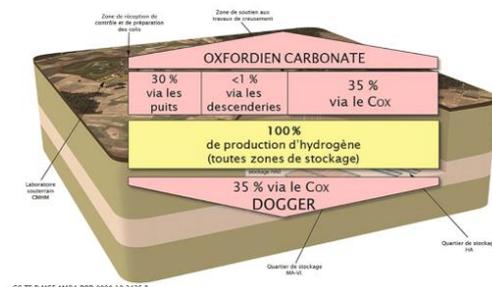


Fig.5

Figure 28. Bilan de la répartition de l’hydrogène à un million d’années [174].

Au cours de l’instruction, l’Andra a confirmé que les résultats présentés ci-dessus prennent bien en compte l’architecture du stockage actualisée au stade du DDAC, ainsi que le concept de scellement « passant au gaz » maintenant retenu en concept de référence. L’Andra a également précisé que les simulations présentées ci-dessus prennent en compte une pression capillaire d’entrée de gaz non nulle dans les différents matériaux poreux.

6.2.2. Terme source gaz

L’Andra considère que l’hydrogène est l’espèce gazeuse prépondérante à prendre en compte dans l’évaluation du « terme source gaz ». Cet hydrogène est principalement produit par corrosion anoxique des métaux dans le stockage (armatures des revêtements/soutènements de galeries, armatures des bétons présents dans les alvéoles MA-VL, chemisages et conteneurs des alvéoles HA...), mais également dans une moindre mesure par radiolyse de certains déchets MA-VL et/ou de l’eau présente dans les bétons en contact avec les déchets dans les alvéoles MA-VL (cf. Figure 24).

L'Andra précise que la seule forme de corrosion retenue pour l'estimation globale de la production d'hydrogène après fermeture du stockage est la corrosion généralisée en milieu anoxique et retient l'hypothèse d'une décroissance des vitesses de corrosion dans le temps du fait de la passivation des surfaces d'aciers (cf. chapitre 7.3). Sur cette base, différentes vitesses de corrosion, considérées constantes, sont retenues selon les matériaux et leur environnement, avec des valeurs intermédiaires entre le maximum attendu peu après fermeture et le minimum après passivation du métal ; ces valeurs sont inférieures à la vitesse de corrosion de 10 $\mu\text{m}/\text{an}$ retenue dans les calculs de tenue mécanique du chemisage et de durée d'étanchéité du conteneur de stockage HA (cf. chapitre 7.3). L'Andra considère également que tous les matériaux métalliques (non démantelés) introduits initialement dans le stockage sont soumis à la corrosion et que la saturation en eau est en tout point suffisante pour ne pas limiter les réactions de corrosion, et ce dès la fermeture de l'installation souterraine. Enfin, une analyse de sensibilité réalisée par l'Andra montre qu'une variation de $\pm 20\%$ sur la valeur du terme source calculé induit une variation de $\pm 0,5\text{ MPa}$ sur la pression maximale de gaz atteinte dans le stockage.

L'analyse de l'IRSN ci-dessous porte d'abord sur les sources de gaz non prises en compte par l'Andra dans son évaluation du terme source, puis sur les cinétiques de production de gaz considérées pour évaluer le pic de production de gaz.

Les différentes sources de gaz

Concernant les volumes d'hydrogène issus des processus radiolytiques dans les alvéoles HA, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le débit de dose à l'extrados du chemisage, pouvant atteindre entre 1 à 3 Gy/h à la mise en place des colis et diminuant au cours du temps avec la décroissance radioactive des déchets, n'est pas suffisant pour générer une production significative d'hydrogène par radiolyse. Compte tenu de la durée de la production d'hydrogène par corrosion, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'années, les volumes additionnels générés par radiolyse de l'eau dans les jeux entre la roche et le chemisage et au sein du MREA (porosité de 80 %) sont donc, selon l'Andra, négligeables. **L'IRSN convient que la production d'hydrogène par radiolyse de l'eau dans les alvéoles HA devrait être effectivement très faible.**

Concernant la production d'autres gaz que l'hydrogène par radiolyse, l'Andra précise que l'hydrogène représente, quels que soient les déchets MA-VL, plus de 50 % des espèces gazeuses produites lors de la radiolyse des polymères qu'ils contiennent. En particulier, l'hydrogène représente plus de 90 % des espèces gazeuses générées lors de la radiolyse des bitumes (matrice d'enrobage des boues radioactives présentes dans les déchets MA-VL2). Aussi, la proportion d'hydrogène générée par radiolyse des déchets MA-VL représentant à peine 1 % de l'hydrogène total produit dans le stockage, l'Andra considère comme négligeable la formation par radiolyse d'autres espèces gazeuses (CO_2 , CH_4 ...) que l'hydrogène. **L'IRSN convient qu'en première approche, la contribution au terme source des autres gaz que l'hydrogène produits par radiolyse en zone MA-VL ne devrait pas dépasser l'ordre du pourcent.** Concernant les gaz produits par biodégradation de la matière organique, l'IRSN concluait au stade du DOS qu'il conviendrait que l'Andra en évalue l'impact sur la production de gaz. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé au cours de l'instruction se baser notamment sur des évaluations de la Nagra du terme source gaz produit par les déchets MA-VL qui montrent, sur la base d'expérimentations dans des conditions de simulations tenant compte d'hypothèses pénalisantes (biodégradabilité maximale des matières organiques et activité bactérienne non limitée), que les volumes de CH_4 et de CO_2 produits par biodégradation sont inférieurs de deux ordres de grandeur au volume d'hydrogène produit par corrosion, et que ceux de NH_3 et H_2S sont de trois ordres de grandeur inférieurs. L'Andra ajoute, sur la base d'une expérimentation conduite au Mont-Terri, que l'activité de certains micro-organismes peut également conduire à la consommation d'hydrogène en lien avec la stœchiométrie des réactions (par exemple, la formation d'une mole de $\text{N}_2/\text{H}_2\text{S}$ ou CH_4 requiert la consommation de 4 ou 5 moles de H_2). Au final, l'Andra précise que les volumes de gaz produits et/ou consommés par l'activité des micro-organismes (espèces azotées par exemple - NO , N_2O et N_2 – produites par réduction des nitrates/nitrites) sont difficiles à estimer car soumis à de nombreuses incertitudes, mais sont faibles par rapport à ceux produits par corrosion, et ne sont donc pas pris en compte lors de ces évaluations. **L'IRSN convient, sur la base de la littérature disponible, que la contribution au terme source des gaz produits**

par biodégradation (matière organique et nitrate/nitrite) peut difficilement être estimée et qu'elle est en première approche négligeable au regard des autres contributions.

Concernant les radionucléides susceptibles d'être sous forme gazeuse dans l'installation de stockage après sa fermeture, seul le ^{14}C , en raison de sa grande quantité dans l'inventaire radiologique et de sa période radioactive longue, fait l'objet d'une estimation volumique par l'Andra [174] : le nombre total de moles dans l'ensemble des déchets du stockage (plus de 99 % étant présents dans le quartier de stockage MA-VL) est estimé à quelques dizaines de milliers environ, ce qui est cinq ordres de grandeurs en dessous de celui produit par corrosion selon les estimations de l'Andra. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Compte tenu de ces différents éléments, **l'IRSN estime qu'en l'état des connaissances, l'étude de sensibilité de la pression de gaz au terme source présentée par l'Andra (cf. chapitre 6.2.4), qui considère une variation de +/-20 % sur le terme source, couvre bien les incertitudes précitées.**

Les cinétiques de production de gaz considérées par l'Andra pour évaluer le pic de production de gaz

Au stade du DDAC, l'Andra ne retient qu'un seul jeu d'hypothèses pour évaluer le pic de production de gaz, tenant compte notamment d'une resaturation immédiate du stockage, d'une vitesse de corrosion unique par type d'acier, et du démarrage des processus de corrosion dès la fermeture de l'installation souterraine. A cet égard, l'IRSN souligne que l'intensité du pic de pression de gaz dépend fortement des vitesses de corrosion retenues et du choix du début du processus, puisque cette cinétique conditionnera la migration plus ou moins facile de l'hydrogène au sein du système de stockage (selon le degré de saturation des différents composants du stockage, notamment). L'IRSN estime globalement pénalisant le choix de l'Andra de retenir des vitesses de corrosion plus faibles que pour ses calculs de tenue mécanique du chemisage et de durée d'étanchéité du conteneur de stockage HA, puisque cela conduit à une production de gaz importante plus tardive, après resaturation des ouvrages et notamment des noyaux de scellements, ce qui minimise la migration par la voie air et maximise la montée en pression. **L'IRSN estime cependant nécessaire que, pour consolider son évaluation des pics de production de gaz par quartier de stockage, l'Andra produise une analyse de sensibilité prenant en compte d'autres hypothèses**, par exemple une gamme de vitesses de corrosion plus large ainsi que d'autres scénarios de resaturation (progressive, différente selon les quartiers, etc.). Cette nouvelle étude de sensibilité devrait également faire apparaître l'évolution des productions de gaz relative aux scénarios d'adaptabilité du stockage à l'inventaire de réserve. Ces éléments sont repris dans la conclusion de l'IRSN présenté au chapitre 6.2.4 relatif à la pression maximale de gaz, qui a donné lieu à l'[engagement 2024-E14](#) de l'Andra.

6.2.3. Seuil de fracturation du Callovo-Oxfordien

L'excavation provoque l'apparition d'une zone de roche endommagée autour des ouvrages et l'Andra considère que, lorsque ces ouvrages sont mis sous pression par un gaz, la faible viscosité de ce fluide et sa compressibilité font que la pression au bout des fractures est pratiquement égale à celle de l'ouvrage pressurisé [81]. Ainsi, dès que la pression de gaz dans l'ouvrage atteint ou dépasse la valeur de la contrainte naturelle la plus faible dans la roche, certaines fractures se propagent. Si cette contrainte est horizontale, la fracture se propage verticalement ; si cette contrainte est verticale, la fracture se propage horizontalement.

L'Andra [81] indique que, dans le COX, les contraintes naturelles horizontale mineure (σ_h) et verticale (σ_v) sont presque égales, avec une légère infériorité pour la contrainte horizontale mineure (σ_h) sur la majeure partie du COX. Cependant, les valeurs les plus faibles sont atteintes sous les vallées par la contrainte verticale (σ_v) dont l'estimation conduit à une valeur comprise entre 11,3 et 11,5 MPa ($\pm 0,3$ MPa). La Figure 29 montre les isovaleurs de cette contrainte verticale (σ_v). Aussi, l'Andra retient comme seuil de fracturation « en grand » (i.e. sur toute la hauteur) du COX une valeur de 11,3 MPa ($\pm 0,3$ MPa).

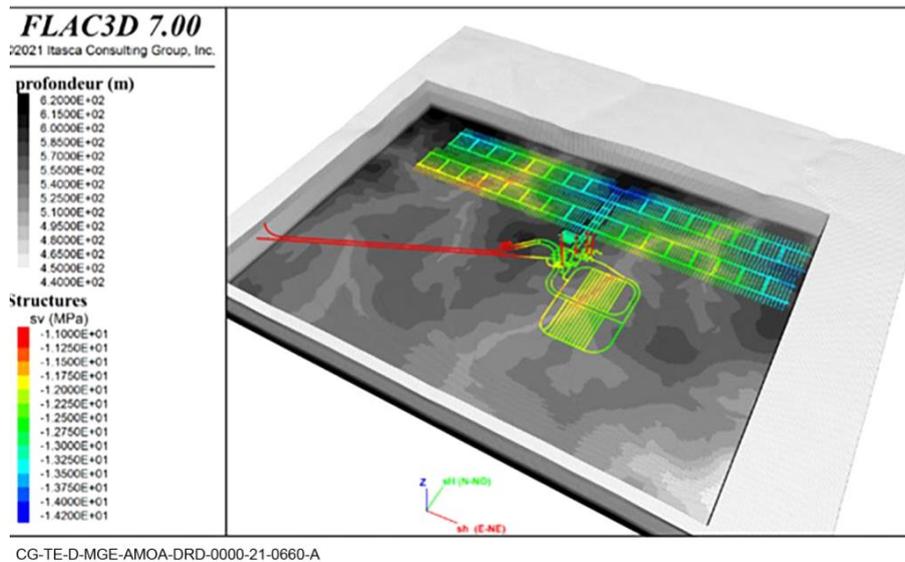


Figure 29. Contrainte naturelle verticale au niveau des ouvrages de l'installation de stockage Cigéo [81].

L'IRSN observe que cette valeur minimale de contrainte naturelle verticale est atteinte dans les quartiers MA-VL et HA et qu'elle est légèrement inférieure aux 12 MPa habituellement retenus à partir du poids des terres sur une hauteur de 500 m. L'IRSN rappelle qu'au stade du DOS, le seuil de fracturation était évalué entre 10 et 12 MPa, ce qui est cohérent avec la valeur affinée retenue à présent par l'Andra. Cependant, l'IRSN rappelle que des variations de ± 3 MPa sont observées selon le niveau du COX concerné (cf. chapitre 5.1.1) ; par exemple, la valeur de la contrainte σ_h au milieu du COX est évaluée à 10 MPa. **L'IRSN estime donc que la valeur retenue ne prend pas en compte la variabilité des mesures de σ_h effectuées dans le COX, celles-ci pouvant être plus faibles que 11,3 MPa [34].**

Par ailleurs, l'Andra [81] indique que la fracturation au gaz des argilites a fait l'objet de plusieurs expérimentations. Ainsi, les essais menés dans le forage EST363 (depuis la surface) et PGZ1202 mené dans le LSMHM ont atteint, respectivement, des pressions de gaz de 11,9 et 14,1 MPa sans provoquer de fracturation dans la roche. Cependant, l'Andra indique qu'une cinétique d'injection de gaz plus lente que celle d'un essai classique peut conduire à l'initiation et à la propagation de fractures au voisinage immédiat d'un ouvrage pour des pressions de gaz de l'ordre de 10 MPa. Cela conduirait, le cas échéant, à de faibles extensions de fractures de la zone de roche endommagée par l'excavation qui, selon l'Andra, ne peuvent pas traverser le COX. Ainsi, l'essai PGZ1201-GAS3 mené avec une cinétique lente a conduit à une rupture autour du forage pour 10,45 MPa. L'essai PGZ1201-GAS2 est quant à lui resté neuf mois à 9,8 MPa sans provoquer de fracturation. L'interprétation donnée par l'Andra est que pour une injection lente, le gaz pénètre dans les fractures créées lors du creusement et modifie les pressions interstitielles et contraintes effectives. L'Andra précise que des simulations numériques ont été menées, notamment dans le cadre du projet international DECOVALEX, mais que la complexité de la fracturation initiale présente autour des ouvrages ainsi que la difficulté de modéliser l'initiation et la propagation des fractures dans le COX ne permettent pas encore une bonne reproduction des résultats observés. L'IRSN ajoute qu'en plus des phénomènes évoqués ci-avant par l'Andra pour interpréter ces essais, et eu égard aux échelles de temps de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers d'années du transitoire hydraulique-gaz, le rôle du comportement différé des argilites mériterait également d'être évalué pour être, le cas échéant, pris en compte dans les simulations. S'agissant plus globalement des essais à cinétique lente réalisés par l'Andra, l'IRSN constate qu'une micro-fracturation peut apparaître en paroi ou se réactiver pour une pression de gaz de l'ordre de 10 MPa. L'IRSN souligne le rôle joué par la zone endommagée par l'excavation dans le déclenchement et la complexification de ce phénomène et souligne également que la cinétique liée au transitoire hydraulique-gaz attendu dans Cigéo sera encore plus lente que celle des essais réalisés.

Les observations réalisées par l'Andra montrent que cette micro-fracturation reste confinée en paroi, ce qui ne remet donc pas directement en cause l'absence de risque de fracturation « en grand » du COX. Cependant, la compréhension et la modélisation de ce phénomène ne sont pas encore satisfaisantes, ce qui milite pour l'introduction d'une marge de sûreté entre la pression maximale de gaz attendue dans le stockage et le seuil de fracturation actuellement retenu par l'Andra. **L'IRSN estime que, d'après les essais réalisés à ce stade, une valeur de l'ordre de 10 MPa pourrait être retenue pour le seuil de fracturation.**

L'IRSN indique qu'un phénomène similaire est connu dans les stockages souterrains de gaz et que la pratique usuelle, établie en vue de ne pas perdre trop de gaz dans la roche, est de maintenir une marge de 15 à 20 % entre la pression maximale dite « de service » et la contrainte naturelle à ne pas dépasser [175]. Cette pratique, issue d'un important retour d'expérience industriel, a sans doute contribué à ce que les accidents de fracturation « en grand » des stockages de gaz soient rares. Bien que cette règle ne soit pas directement applicable à Cigéo, l'IRSN observe qu'elle conduirait⁶⁰ à une dizaine de mégapascals, ce qui coïncide avec les observations réalisées par l'Andra et constitue sans doute un ordre de grandeur à prendre en compte.

Aussi, **l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre les efforts de R&D visant à améliorer la compréhension et la modélisation de l'initiation et de la propagation des fractures dans le COX, en s'attachant notamment à préciser les liens entre les situations expérimentales et celles attendues lors du transitoire hydraulique-gaz du projet Cigéo.**

Enfin, l'IRSN souligne que la sollicitation due aux gaz fait partie du scénario d'évolution normale du projet Cigéo et que la pression maximale de gaz attendue dans le stockage peut donc être vue comme une pression maximale de service pour un stockage souterrain de gaz, pression pour laquelle une telle installation est habituellement testée avant sa mise en service. Par conséquent, **l'IRSN considère que la capacité de la roche à résister à la pression maximale de gaz attendue dans le stockage devra être vérifiée pour l'ensemble de l'installation souterraine**, ce qui compte tenu de son emprise (plusieurs km²) et de sa durée de construction (plus d'un siècle) nécessitera de la tester au fur et à mesure de sa construction, selon un maillage qui reste à définir. Aussi, **l'IRSN considère que l'Andra devra définir :**

- **une exigence relative à la pression maximale de gaz à ne pas dépasser dans le stockage, qui tienne compte d'une marge par rapport au seuil de fracturation « en grand » du COX ;**
- **une méthodologie permettant de vérifier *in situ*, au fur et à mesure de la construction de l'installation souterraine, que la résistance de la roche permet de satisfaire cette exigence. Cette méthodologie devra être mise au point au début de la phase industrielle pilote et sa version opérationnelle devra être présentée avant le creusement des premiers alvéoles destinés à recevoir les colis.**

Cette méthodologie pourra ensuite être incluse dans un programme plus général de reconnaissance à l'avancement ou de réception des ouvrages, selon qu'elle s'opère avant ou après construction de ceux-ci. L'IRSN souligne que pour l'application de cette démarche, il serait préférable que les évolutions futures du projet Cigéo se fassent dans le sens d'une diminution de la pression maximale de gaz attendue dans le stockage, afin de ne pas avoir à réévaluer à des pressions plus grandes des ouvrages déjà construits.

Sur la base de ces éléments, l'Andra a formulé l'**engagement 2024-E13**, par lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 (cf. Annexe A2). L'IRSN considère que cet engagement est satisfaisant sur le principe, mais souligne que la manière la plus usuelle de mesurer une contrainte *in situ*, pour laquelle l'Andra s'engage à définir un programme de caractérisation, est par fracturation hydraulique. Or, il conviendrait que la vérification de la capacité de la roche à supporter une pression de gaz ne conduise pas à la fracturation de celle-ci. Par conséquent, il appartiendra à l'Andra de définir un programme de « *tenu à la fracturation sous chargement fluide* » ne reposant pas forcément sur les mêmes méthodes ni réalisé aux mêmes endroits mais pouvant être mis en œuvre lors des mêmes campagnes.

⁶⁰ $0,80 \times 12 = 9,6$ MPa, $0,85 \times 12 = 10,2$ MPa

6.2.4. Pression maximale de gaz attendue dans le stockage

La simulation numérique réalisée par l'Andra et présentée au chapitre 6.2.1 ci-avant montre que les durées de resaturation s'étalent sur des échelles de temps qui vont de quelques dizaines d'années pour la partie supérieure des scellements de liaison surface-fond à des durées de l'ordre de 500 000 ans pour les galeries du quartier MA-VL, avec une valeur de l'ordre de 1 000 ans pour une saturation à 95 % des scellements de fond. L'IRSN observe que ces valeurs sont cohérentes avec les ordres de grandeur habituellement calculés (cf. projet EURAD GAS) et relève que les expériences *in situ* montrent généralement des durées de resaturation plus longues que calculées. Néanmoins, l'IRSN précise que des durées de resaturation plus longues iraient dans le sens d'une diminution de la pression de gaz attendue dans le stockage ; les estimations présentées par l'Andra sont donc conservatives de ce point de vue.

La simulation numérique de l'Andra montre également que la pression maximale de gaz évaluée dans le stockage avec un jeu de paramètres dit « de base » est de 7 à 7,5 MPa (cf. chapitre 6.2.1). L'IRSN rappelle que cette valeur était de 5 à 6 MPa au stade du DOS et estime que cette augmentation s'explique, entre autres, par : (i) l'amélioration phénoménologique des modèles de calcul, notamment la prise en compte d'une valeur non nulle de la pression d'entrée de gaz dans les milieux poreux dont l'importance a été montrée par l'IRSN [176][177] ; (ii) l'augmentation de la quantité d'acier dans le stockage, par exemple par l'introduction de voussoirs en béton armé dans le concept de stockage, et (iii) l'optimisation des concepts, qui tend à diminuer le volume excavé pour un même inventaire. L'Andra [81] précise que le retour d'expérience et les comparaisons réalisées lors de benchmarks internationaux tels que le projet FORGE (*Fate Of Repository GasEs*) montrent que la dispersion des résultats obtenus par différentes équipes de modélisation pour une évaluation donnée (i.e. pour un jeu de paramètres donné) est de l'ordre de 1 MPa.

L'IRSN estime que ce résultat de 7 à 7,5 MPa (± 1 MPa) obtenu avec une simulation « médiane » est a priori satisfaisant dans la mesure où il est inférieur au seuil de fracturation « en grand » retenu par l'Andra (11,3 MPa $\pm 0,3$ MPa) et même inférieur à la pression de 10 MPa pour laquelle un début de micro-fracturation a été observé dans certains essais réalisés *in situ* avec des cinétiques lentes (cf. chapitre 6.2.3). Néanmoins, l'IRSN souligne que l'incertitude de ± 1 MPa mise en évidence par les différentes équipes de modélisation est essentiellement « numérique », liée à la complexité des équations mathématiques à résoudre, et ne prend pas en compte la dispersion naturelle des données ni l'influence possible de phénomènes négligés.

À cet égard, l'Andra indique [174] que des études de sensibilité ont été réalisées, qui montrent que l'influence de ces incertitudes résiduelles sur les valeurs caractéristiques du transitoire hydraulique-gaz est faible et n'induit pas d'« effet falaise ». Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé [178] que ces études de sensibilité se répartissent en deux volets :

- des études de sensibilité monoparamétriques réalisées autour du jeu de données de base et visant à couvrir des incertitudes et variabilités de toutes natures (évolution de la zone endommagée, production et consommation d'hydrogène, désaturation liée à la ventilation, caractéristiques hydrauliques des noyaux de scellement, des remblais et du COX, etc.). L'IRSN note que dans la plupart des cas, l'effet sur les pressions de gaz est de $\pm 0,5$ MPa ;
- une étude de sensibilité multiparamétrique visant à estimer une « valeur haute » de la pression maximale de gaz dans le stockage et retenant de ce fait une valeur élevée des paramètres les plus influents identifiés précédemment. La pression maximale de gaz ainsi obtenue est de l'ordre de 10 MPa ± 1 MPa. L'Andra souligne que le jeu de paramètres choisi pour obtenir ce résultat est très peu réaliste et cumule, notamment, une production d'hydrogène maximale, une capacité de dissolution de l'hydrogène minimale et une valeur élevée de la perméabilité des argilites.

L'IRSN constate que la limite supérieure de cette « valeur haute » (10+1 MPa) atteint la limite inférieure du seuil de fracturation « en grand » retenu par l'Andra (11,3-0,3 MPa), ce qui n'est pas satisfaisant. De plus, si l'IRSN ne conteste pas le caractère peu vraisemblable de la combinaison de cas ayant conduit à cette « valeur haute », l'IRSN rappelle que le modèle « de base » utilisé pour faire ces calculs a été conçu pour être « médian », ce qui

n'est pas pénalisant. Enfin, l'IRSN considère que ce modèle présente un certain nombre de lacunes, notamment pour ce qui concerne l'évaluation de l'influence du calage des nombreux paramètres qu'il comporte, la justification de la phénoménologie prise en compte (phénomènes d'hystérésis qui accompagnent les cycles de désaturation-resaturation [179]) et la validation numérique et expérimentale. Sur ce dernier point, l'IRSN note que la représentation de la zone de roche endommagée par l'excavation (ZFC et ZFD) est relativement originale (basée sur la représentation explicite d'un réseau de fractures) et considère que cette représentation doit être validée, au moins numériquement par comparaison avec d'autres modélisations, ou par comparaison avec des résultats expérimentaux. L'IRSN observe enfin que l'ensemble du modèle numérique présenté par l'Andra n'a pas été validé expérimentalement par rapport aux expériences d'injection de gaz telles que PGZ1-GAZ réalisée au LSMHM.

Ainsi, l'IRSN estime que le modèle « de base » présenté par l'Andra doit encore être consolidé puis revalidé par rapport aux essais PGZ. À cet égard, compte tenu de la différence d'échelle entre les dimensions de l'essai PGZ et celles de l'installation souterraine de Cigéo, l'IRSN considère que ce modèle devrait aussi être confronté à des résultats obtenus sur des ouvrages de dimensions plus représentatives, que ce soit dans le cadre du suivi de l'installation souterraine durant la phase industrielle pilote (par exemple, à l'occasion du suivi de l'effet de la ventilation sur les ouvrages) ou sur un essai plus grand à définir. Enfin, l'IRSN estime que l'étude de sensibilité réalisée par l'Andra doit être mise à jour, notamment en prenant en compte les incertitudes sur le « terme source » évoquées au chapitre 6.2.2, afin d'assurer l'existence d'une marge non nulle entre la pression maximale de gaz attendue dans le stockage et le seuil de fracturation du COX.

Aussi, concernant l'évaluation de la pression maximale de gaz attendue dans le stockage, l'IRSN considère que l'Andra devra, en vue du bilan de la phase pilote :

- **évaluer la nécessité de prendre en compte les effets de l'hystérésis, le cas échéant compléter le modèle de calcul utilisé, puis poursuivre la vérification numérique et la validation expérimentale de ce modèle sur des ouvrages représentatifs ;**
- **affiner, à l'aide de ce nouveau modèle, l'étude de sensibilité afin d'apprécier l'influence des différents paramètres (physiques et/ou numériques), phénomènes et autres données incertaines telles que le terme source, et ainsi de s'assurer que la pression maximale de gaz calculée dans le stockage respecte l'exigence relative au seuil de fracturation qui aura été définie.**

Sur ces deux points, l'Andra a pris l'[engagement 2024-E-14](#) par lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 (cf. Annexe A2), que l'IRSN estime satisfaisant.

6.2.5. Effet piston

L'Andra indique [174] que sous l'effet de la montée en pression des gaz, des flux d'eau apparaissent à travers les scellements du quartier HA entre 1 000 et 10 000 ans après fermeture. Ce phénomène, appelé « effet piston », correspond à un déplacement d'eau induit par la pression des gaz. Les déplacements d'eau qui en résultent sont de l'ordre de quelques décimètres au plus après 10 000 ans. L'Andra considère que cet « effet piston » ne contribue donc pas significativement à la migration des radionucléides.

L'IRSN indique avoir retrouvé le même ordre de grandeur de vitesse moyenne d'eau par ses propres calculs [180], sur une durée néanmoins plus longue que celle indiquée par l'Andra. Toutefois, l'IRSN constate que le débit d'eau induit par cette vitesse (quelques centaines de litres/an) est du même ordre de grandeur que celui attendu en conditions « enveloppe » du SEN⁴⁵, ce qui peut donc rester acceptable. **Par conséquent, l'IRSN estime qu'à ce stade de développement du projet Cigéo (i.e. état des connaissances et concepts retenus), l'hypothèse de l'Andra selon laquelle l'impact de l'effet piston n'est pas majeur est justifiée.** Ce point est repris dans le cadre du GP3 relatif à l'évaluation de sûreté après fermeture du stockage.

6.3. Effets des perturbations transitoires géomécaniques sur les propriétés de transfert du COX

Ce chapitre rappelle, dans un premier temps, l'état des connaissances sur la zone de roche endommagée par le creusement des ouvrages souterrains dans le COX. Il présente ensuite l'examen par l'IRSN de l'impact possible de cette zone endommagée sur les propriétés hydrauliques des argilites au droit d'ouvrages importants pour la sûreté à long terme du stockage : les parties de puits destinées à être scellées, les alvéoles MA-VL et les alvéoles HA.

6.3.1. Endommagement du COX lié au creusement des ouvrages

Ainsi que présenté au chapitre 2.1.3 du présent rapport, la formation hôte dans laquelle est prévue l'installation souterraine du projet Cigéo se compose de différentes séquences sédimentaires (cf. Figure 2) qui présentent une proportion de carbonates, et donc une résistance mécanique, décroissante du haut vers le bas de la formation. L'Andra les regroupe en trois unités appelées USC, UT et UA. L'UA représente les deux tiers inférieurs de la formation hôte et est divisée en deux sous-unités : UA1 et UA2. C'est au toit de la sous-unité UA2 qu'ont eu lieu la plupart des expérimentations menées aux LSMHM (-490 m), les autres ayant eu lieu dans la « niche » (-445 m) creusée au sein de l'USC.

Les milieux souterrains sont soumis à un champ de contraintes naturelles issu principalement du poids des formations sus-jacentes et de la tectonique. L'Andra [181] rappelle que le creusement d'un ouvrage souterrain provoque une redistribution locale des contraintes pouvant conduire à la formation d'une zone de roche aux propriétés de confinement potentiellement dégradées, dite « zone endommagée initiale », susceptible d'évoluer au cours du temps, notamment par « auto-colmatage » (cf. *infra*).

Concernant l'UA dans laquelle se trouve le niveau principal du LSMHM, la résistance mécanique de la roche est relativement faible (résistance en compression simple de 21 ± 7 MPa en moyenne) du fait de la forte proportion d'argiles [181]. La fracturation observée est importante et étendue, avec une extension proportionnelle au rayon excavé pour des dimensions allant du boulon d'ancrage (centimétrique) à des galeries de 9 m de diamètre. La Figure 30 montre que l'orientation des galeries par rapport aux contraintes naturelles a une influence sur l'organisation et l'orientation de la fracturation induite. L'endommagement résultant du creusement des ouvrages se structure ainsi de la façon suivante :

- une zone fracturée connectée (**ZFC**) formant un réseau dense 3D dans lequel coexistent des fractures en extension et en cisaillement, dont l'ouverture varie beaucoup et peut atteindre plusieurs millimètres. La transmissivité initiale de la ZFC est importante. Cependant, les mesures ne montrent pas toujours de coïncidence exacte entre l'extension de la ZFC et les fortes conductivités hydrauliques ;
- une zone de fracturation « discrète » (**ZFD**), située au-delà de la ZFC, où ne subsistent que les extrémités de certaines fractures, non connectées entre elles. La conductivité hydraulique décroît rapidement en fonction de la distance à la paroi, qu'il y ait ou non des fractures exprimées dans la ZFD.

L'Andra [181] avait confirmé au stade du DOS, notamment à l'issue de l'expérimentation CDZ réalisée au LSMHM, que l'UA présente des propriétés d'auto-colmatage :

- l'application d'un effort mécanique à la paroi d'un ouvrage conduit à une refermeture du réseau de fractures et à une diminution de la perméabilité dans la ZFC. Par la suite, le déchargement de cette pression ne conduit pas à une ré-augmentation de la perméabilité ;
- la présence de minéraux argileux gonflants (smectites) se manifeste par un processus de cicatrisation hydraulique des fractures, qui permet à la zone endommagée de retrouver des valeurs de perméabilité à l'eau proches de celles des argilites intactes, pour autant que l'ouverture des fractures reste limitée.

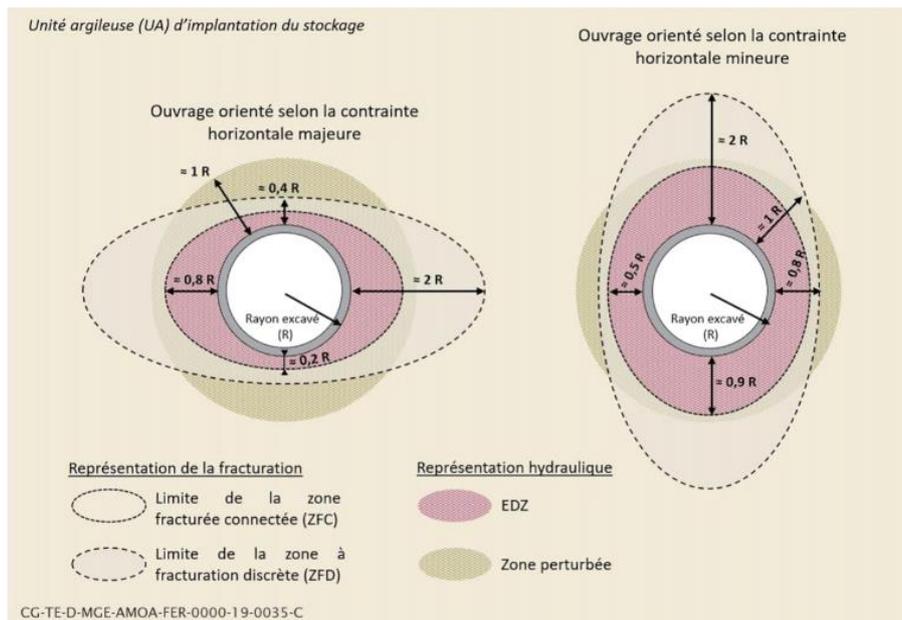


Figure 30. Représentation schématique de la zone endommagée autour des ouvrages dans l’UA et correspondance hydraulique avec l’EDZ et la zone perturbée [181]. R : rayon de l’ouvrage excavé.

Concernant l’USC, l’Andra [181] indique que la roche, plus carbonatée que dans l’UA, a une résistance en compression simple supérieure à 30 MPa. La zone endommagée se présente sous la forme d’une fracturation très hétérogène, localement connectée ou non, moins importante que dans l’UA et ressemblant à un modèle de type « pelures d’oignon » observé par ailleurs au Mont-Terri ([187], cf. Figure 31 ci-après). Cette fracturation conduit à des valeurs de conductivité hydraulique initiale potentiellement élevées en paroi (à l’emplacement des fractures) mais qui décroissent rapidement avec la distance jusqu’à des valeurs proches de celles des argilites saines ($< 10^{-10}$ m/s) au-delà de 0,5 m de la paroi (pour des ouvrages de 4,5 m de diamètre). Le potentiel d’auto-colmatage existe mais y est très limité. L’Andra indique qu’au niveau de l’UT, où les propriétés d’auto-colmatage n’ont pas fait l’objet d’expérimentations, cet auto-colmatage devrait *a priori* être plus important que dans l’USC du fait d’une teneur croissante en argiles en descendant vers l’UA, ce dont l’IRSN convient.

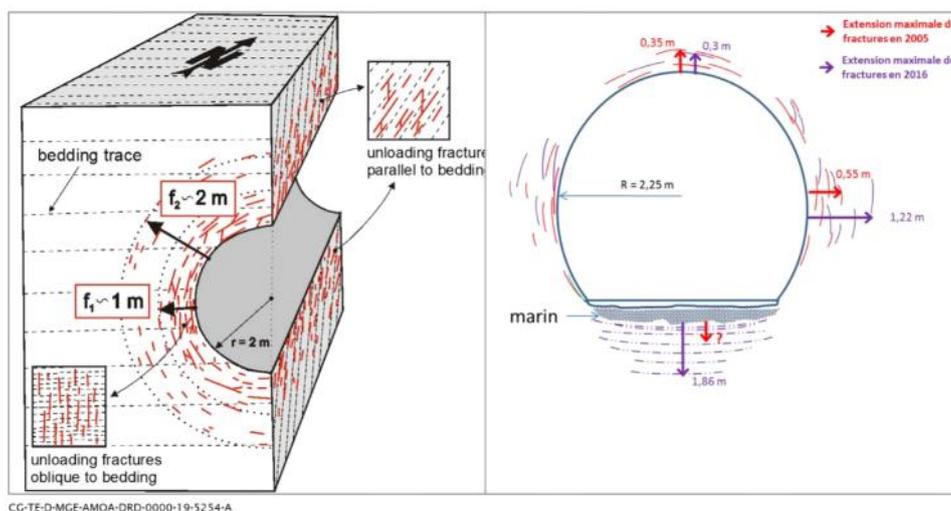


Figure 31. Représentation de l’endommagement induit autour des ouvrages dans l’argile à Opalines observé au Mont-Terri (à gauche) ; modèle 2D de la fissuration induite autour de la niche à -445 mètres au LSMHM (schéma non à l’échelle) en 2005 et 2016 (à droite)

D'un point de vue hydraulique, l'Andra [181] définit les notions de « roche saine », de « roche endommagée », d'EDZ (*Excavation Damaged Zone*) et de « roche perturbée » de la façon suivante : la roche saine est définie sur la base d'un calcul statistique réalisé sur l'ensemble de la formation hôte, en retenant la borne maximale de conductivité hydraulique horizontale, évaluée à $2,6 \cdot 10^{-12}$ m/s avec un intervalle de confiance de 95 % (cf. chapitre 6.1.1) ; pour des valeurs supérieures, la roche est considérée comme endommagée. Concernant l'EDZ (*Excavation Damaged Zone*), l'Andra [181] reprend la définition proposée par [183] selon laquelle ce terme désigne une zone de roche où les perturbations hydromécaniques et géochimiques induites par le creusement entraînent des variations significatives des propriétés hydrauliques et de transport des solutés. Par convention, pour les évaluations de sûreté, l'Andra définit ainsi l'EDZ comme une zone de roche dont la conductivité hydraulique est supérieure à 10^{-10} m/s. Enfin, la zone perturbée est définie comme ayant une conductivité hydraulique comprise entre les deux valeurs indiquées ci-avant, c'est-à-dire entre 10^{-10} m/s et environ $3 \cdot 10^{-12}$ m/s.

La Figure 30 illustre les limites d'extension des ZFC, ZFD, EDZ et de zone perturbée finalement retenues par l'Andra et fait le lien avec la représentation hydraulique dans l'UA. L'IRSN souligne que ces extensions de zones endommagées (Figure 31) sont issues d'observations faites au LSMHM et qu'elles résultent donc des contraintes naturelles et de la résistance de la roche à 490 m de profondeur. Or, le chapitre 5.1.1 du présent rapport souligne une variabilité de ces contraintes naturelles selon les couches du COX, qui pourrait conduire à de légères différences de comportement mécanique à l'échelle de Cigéo par rapport aux observations faites au LSMHM. Cette remarque vient à l'appui de la conclusion de l'IRSN relative au programme de reconnaissance à l'avancement indiquée au chapitre 5.1.4 du présent rapport.

Concernant les différentes définitions retenues par l'Andra, l'IRSN rappelle que la limite de conductivité hydraulique retenue pour définir des argilites saines ($< 3 \cdot 10^{-12}$ m/s) est une valeur haute issue d'un calcul statistique, et observe que la valeur choisie pour définir l'EDZ ($> 10^{-10}$ m/s) est d'un ordre de grandeur au-dessus de la conductivité hydraulique visée par les ouvrages de scellement les plus performants ($< 10^{-11}$ m/s) ce qui, pour un choix conventionnel, est cohérent puisqu'il rend compte de l'attention à porter à l'efficacité du système de fermeture de l'installation pour limiter l'impact sur la sûreté de celle-ci.

De manière générale, **l'IRSN souligne les progrès réalisés par l'Andra** notamment depuis le creusement du LSMHM pour caractériser et comprendre l'endommagement du COX. Des nombreuses études menées, il en ressort une bonne compréhension des mécanismes à l'origine de cet endommagement, de la géométrie et des propriétés de la zone endommagée. **L'IRSN estime cependant que les valeurs des paramètres associés à cette géométrie et ces propriétés devraient à ce stade être assorties d'une gamme d'incertitude en raison d'une part, de la variabilité latérale et verticale (selon les couches du COX et la profondeur) des propriétés mécaniques et des contraintes tectoniques (cf. chapitre 5.1.1) (ce d'autant plus que la profondeur d'implantation des ouvrages n'est pas définie par un niveau précis du COX, cf. chapitre 2.2) et d'autre part, de la possibilité que ces propriétés présentent de légères différences au niveau du site par rapport au LSMHM (cf. chapitre 5.1).**

6.3.2. Sections des ouvrages de grand diamètre destinées à être scellées

Au stade du DDAC et comme indiqué *supra*, l'Andra conclut des observations réalisées au LSMHM que l'extension de la zone endommagée située autour des ouvrages dans l'UA est proportionnelle au rayon excavé. L'IRSN s'interroge sur la validité de cette proportionnalité pour l'ouverture des fractures. En effet, certains ouvrages de grand diamètre creusés au LSMHM (e.g. GVA1, de 9 m de diamètre) montrent localement des fractures d'ouverture centimétriques [184]. Sur ce point, l'IRSN estime que le caractère extrapolable des résultats relatifs à l'auto-colmatage issus de l'expérimentation CDZ (cf. *supra*) à l'échelle de galeries de près de 10 mètres de diamètre n'est pas acquis. En effet, l'expérimentation CDZ a été réalisée dans une galerie du LSMHM d'environ 5 m de diamètre et il semble prématuré de considérer qu'elle permet de confirmer l'auto-colmatage de fractures d'ouverture très importante. Ainsi, il conviendrait que l'Andra examine les limites au-delà desquelles le processus d'auto-colmatage des argilites ne permet plus de rétablir une conductivité hydraulique acceptable à la paroi d'un

ouvrage destiné à être scellé. À cet égard, l'ASN avait demandé à l'issue de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » (cf. Annexe T2) que l'Andra définisse pour le DDAC l'acceptabilité de la zone d'argilites endommagées en paroi, en tenant compte d'un possible sur-endommagement produit lors des travaux nécessaires à la mise en place du scellement. Sur ce point, l'Andra considère que les moyens de caractérisation d'une paroi endommagée existent (cf. le retour d'expérience du LSMHM et la pratique usuelle des travaux souterrains : observations visuelles, tomographies, mesures par forages ou carottages...) et que l'acceptabilité d'une zone endommagée en paroi renvoie à la performance attendue des scellements ainsi qu'à des choix de conception simples et robustes et à leurs techniques de mise en œuvre. A ce stade, l'Andra n'a donc pas défini de critère d'acceptabilité de l'endommagement en paroi. L'analyse de ce point renvoie aux options de scellement retenues par l'Andra qui font l'objet du chapitre 8 du présent rapport.

6.3.3. Technique de creusement des puits dans le Callovo-Oxfordien

Les LSF de l'installation souterraine comportent cinq puits regroupés dans la ZSL. Le schéma de principe des scellements de puits envisagés par l'Andra est présenté au chapitre 2.5.2 du présent rapport. L'Andra précise qu'après dépose du revêtement lors des opérations de fermeture, la surface d'argilites qui apparaîtrait fracturée ou altérée sera purgée avant mise en place du scellement sur quelques dizaines de mètres de hauteur au sein des unités USC et UT (cf. chapitre 2.5.2).

L'IRSN observe qu'à la différence des galeries où l'Andra précise que la conception des revêtements est favorable à une dépose [57], l'Andra ne prévoit pas de dispositions particulières pour faciliter la dépose des revêtements au droit des futurs scellements de puits où la verticalité de l'ouvrage pourrait rendre les travaux plus difficiles. Aussi, afin d'anticiper ces difficultés, l'Andra pourrait envisager un revêtement spécialement conçu pour faciliter cette opération de dépose du revêtement dans les puits.

L'Andra [58] indique que les scellements de LSF « *apportent la plus grande efficacité hydraulique du système de stockage* » en participant à la limitation des flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations encaissantes. Aussi, étant donné l'importance de ces ouvrages pour la sûreté de Cigéo, l'Andra [57] précise que la méthode de creusement des LSF doit permettre d'éviter la formation d'une ZFC en paroi, en particulier au niveau des noyaux de scellement. Néanmoins, sur la base du retour d'expérience du LSMHM, l'Andra retient une méthode de creusement à l'explosif pour les puits de Cigéo, similaire à celle utilisée pour creuser les puits et la niche du LSMHM.

L'IRSN considère que cette méthode de creusement par foration-tir n'est pas réputée la plus douce (e.g. [185][186][182][187][188]) par rapport aux méthodes mécaniques, notamment l'excavation par MAP qui pour de petits travaux dans l'argilite peut se montrer encore moins impactante que le BRH. Au cours de l'instruction, l'Andra a confirmé qu'elle ne disposait pas de comparaison entre des surfaces excavées à l'explosif et à la MAP dans l'USC du COX qui montreraient, toutes choses égales par ailleurs, que les explosifs ne provoquent pas plus d'endommagement que la MAP. L'IRSN indique que cette comparaison aurait été utile à l'analyse comparative des techniques de creusement réalisée par l'Andra en réponse à son engagement 2010-E-17.2 de justifier les techniques de creusement du stockage. L'IRSN souligne que, compte tenu de la résistance mécanique de l'USC (> 30 MPa) et des contraintes *in situ* à cette profondeur, le rapport entre la contrainte induite par l'excavation et la résistance de la roche ($r = \sigma_0 / \sigma_c$) « *est inférieur à 1 dans l'USC* » [181], ce qui signifie que la redistribution des contraintes induite par l'excavation dans l'USC devrait en théorie ne provoquer aucun endommagement. En l'absence d'élément contraire, l'IRSN conclut que l'endommagement observé au LSMHM dans l'USC n'est peut-être lié qu'à la méthode de creusement utilisée et que donc, **le recours à une méthode de creusement à l'explosif doit être écarté dans la mesure du possible pour le creusement des LSF et a minima au droit des futurs scellements.**

L'IRSN note que l'Andra [45] mène une veille technologique sur les méthodes de creusement, en particulier sur la réalisation des puits par combinaison de deux nouvelles méthodes de fonçage (*Vertical Shaft sinking Machine* - VSM et *Shaft Boring Roadheader* - SBR) et que les premiers résultats montrent que la combinaison de ces méthodes pourrait être mise en œuvre pour creuser les puits. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que ses

objectifs sont d'assurer la sécurité en phase travaux, d'optimiser les temps et les coûts par réemploi des équipements de creusement d'un puits à l'autre et de consolider la conception des puits, en considérant de nouvelles méthodes de réalisation limitant les zones endommagées. L'Andra a ajouté qu'à ce stade des études, la méthode de référence à l'explosif est retenue sans exclure le choix d'une méthode alternative au droit des zones de scellement afin de limiter la zone endommagée, notamment au toit du COX. Une méthode conventionnelle via une machine BRH/MAP pourrait ainsi être utilisée à la place de l'explosif. L'Andra indique que le choix de la méthode retenue sera décidé avant 2026. L'IRSN relève ainsi qu'il n'existe pas d'obstacle technique à l'utilisation de méthodes de creusement mécaniques. **Sans aller jusqu'à envisager une excavation mécanique sur toute la hauteur des puits, l'IRSN estime qu'il n'existe pas d'obstacle technique à utiliser, au moins localement, une technique de creusement plus douce telle que la MAP au droit des futurs scellements.** À cet égard, par lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 (cf. Annexe A2 du présent rapport), l'Andra a formulé **l'engagement 2024-E-11**.

L'IRSN considère que cet engagement n'est pas satisfaisant car pour être convaincante, l'« analyse croisée » entre l'endommagement induit par les méthodes de creusement et la capacité de traitement du COX nécessiterait la réalisation d'essais dans l'USC du COX dont la durée nécessaire à la définition, réalisation et interprétation ne semble pas compatible avec les délais espérés pour une prise de décision à l'issue des études PRO/EXE citées. Par ailleurs, cet engagement se réfère à un objectif de performance visée et non pas à une utilisation des meilleures techniques disponibles pour réaliser un élément important pour la sûreté après la fermeture de Cigéo. À cet égard, l'IRSN souligne que la performance globale visée par un scellement de LSF suppose l'absence de zone endommagée conductrice en paroi, qui dégraderait immédiatement la performance de l'ouvrage. À plus long terme, l'influence possible de cet endommagement sur la performance globale de l'ouvrage pendant le transitoire hydraulique-gaz particulier auquel il est soumis (cf. chapitre 8.1 du présent rapport) est encore mal connue. Une réponse à ces interrogations est attendue du démonstrateur de scellement de LSF (cf. chapitre 8.2.3 du présent rapport) qui doit être construit dès le début du creusement de Cigéo dans un diverticule de descenderie. L'IRSN estime que pour faciliter la transposition des résultats qui seront obtenus sur ce démonstrateur au cas des scellements de puits, il serait préférable que la roche accueillant ces différents ouvrages ait été excavée par des techniques de creusement conduisant à des endommagements de même nature. En conséquence,

Recommandation n°2

L'IRSN recommande que l'Andra présente, avant le creusement des puits, la méthode de creusement qu'elle retient, au moins localement au droit des futures zones à sceller, pour ne pas créer plus d'endommagement de la roche qu'avec une méthode de creusement mécanique.

6.3.4. Propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles MA-VL

Afin d'atténuer et de retarder la migration des solutés à travers le COX après la fermeture du stockage, l'Andra [48] indique qu'une épaisseur verticale d'argilites saines dite « épaisseur de garde » d'au moins 50 m doit être préservée au-dessus et en dessous des différentes zones de stockage. Aussi, pour éviter que cette épaisseur de garde ne soit compromise par un possible sur-endommagement des argilites au moment de la rupture des revêtements attendue à long terme, l'Andra [50] limite les taux de vide dans ces ouvrages et en évalue l'influence par une méthode géométrique basée sur le foisonnement⁶¹ de la roche en paroi. Pour cela, l'Andra [189] évalue le volume de roche nécessaire au comblement de l'ensemble des vides de l'alvéole et suppose que ce volume sera fourni par le foisonnement de la roche en paroi. L'Andra considère ensuite différentes hypothèses sur la géométrie de cette zone foisonnée et évalue, sur la base du retour d'expérience acquis au LSMHM, l'extension de la ZFC susceptible d'apparaître autour de ce volume de roche foisonnée en le considérant comme une nouvelle excavation. Dans cette approche, les taux de foisonnement les plus petits sont les plus pénalisants car ils conduisent aux volumes de roche foisonnée les plus grands. Sur cette base, l'Andra établit une relation entre

⁶¹ Augmentation du volume apparent d'une roche après son extraction, par suite de son morcellement.

(i) le taux de vide résiduel laissé dans l'alvéole, (ii) l'extension maximale de ZFC susceptible d'apparaître autour de cet alvéole après rupture de son revêtement et (iii) le taux de foisonnement de la roche qui tomberait de la paroi pour combler ce vide. Cette relation est illustrée en Figure 32 pour un taux de foisonnement de 10 % où la « hauteur excavée » représente le diamètre initial de l'ouvrage et l'« extension » représente l'étendue de la zone de roche endommagée mesurée depuis la paroi de l'excavation initiale.

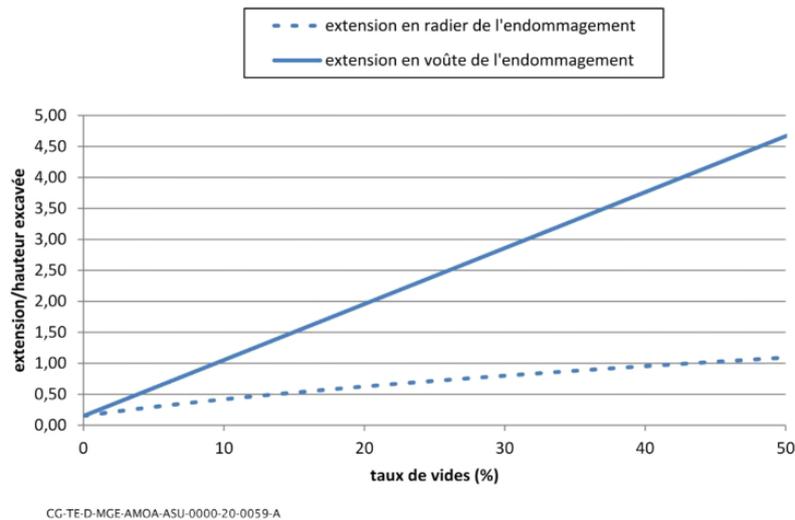


Figure 32. Extensions enveloppes de zone endommagée en voûte et en radier d'un alvéole MA-VL sur le long terme rapportées à la hauteur excavée, en fonction du taux de vides

Lors de l'examen du DOS, l'IRSN avait estimé que cette approche était conservatrice dans son principe mais que le caractère pénalisant du taux de foisonnement retenu (10 %) n'était pas suffisamment justifié.

En complément de cette approche empirique, l'Andra a réalisé pour le DDAC et transmis au cours de l'instruction une étude numérique de l'évolution des alvéoles MA-VL et des galeries, par des approches de simulation discrète (3DEC) et continue (FLAC3D) incluant de nombreux cas paramétriques [190]. Cette étude vise à préciser (i) les temps et mode de rupture des revêtements, (ii) les modes de développement de la zone de roche endommagée après rupture des revêtements et (iii) les modes d'entrée en contact et de mise en charge par le revêtement rompu du contenu de l'ouvrage (colis pour un alvéole, remblai pour une galerie). **L'IRSN estime que cette étude numérique est très complète et constate que, dans tous les cas présentés, la zone de roche endommagée en paroi reste en compression, ce qui est favorable à l'auto-colmatage.**

Cette étude numérique permet à l'Andra de conclure [191] que l'augmentation du chargement mécanique sur les revêtements/soutènements et la dégradation de leurs propriétés mécaniques conduisent à une rupture de ceux-ci, d'abord localisée (entre un et quelques milliers d'années) puis généralisée. L'IRSN note que ce résultat vient conforter l'hypothèse faite dans l'approche empirique dite « par foisonnement » quant au caractère désaturé de l'ouvrage lors de la rupture des revêtements. L'Andra [191] précise également que, à proximité des alvéoles MA-VL, les ruptures successives de revêtement provoquent des décharges de la roche moins brutales que celle due à l'excavation. Enfin, l'Andra précise que la limitation des vides résiduels restreint l'extension de la zone fracturée à quelques mètres au plus, notamment verticalement, ce qui est très inférieur aux estimations fournies par l'approche empirique dite « par foisonnement ». **L'IRSN estime que ces résultats sont satisfaisants.**

En conclusion, **l'IRSN constate que l'Andra dispose à présent de deux approches, l'une empirique permettant une évaluation simple et rapide d'un taux de vide acceptable dans un ouvrage, l'autre plus sophistiquée permettant une prise en compte plus précise de la géométrie et de la phénoménologie du comportement post-fermeture de l'ouvrage, ce qui est satisfaisant.** L'IRSN encourage l'Andra à poursuivre ses efforts afin d'améliorer la représentativité des modèles et à rechercher des moyens de conforter ces résultats par des observations expérimentales, par exemple sur maquettes, *in situ* ou en surface. L'IRSN encourage également l'Andra à poursuivre ses efforts en termes de recherche de méthodes permettant de limiter le plus possible le

taux de vide laissé dans les ouvrages tout en maintenant la récupérabilité des colis pendant la phase d'exploitation.

6.3.5. Propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles HA (THM)

Parmi les déchets destinés à Cigéo figurent les déchets exothermiques HA1/HA2, qui sont susceptibles d'induire un échauffement conséquent sur la roche. L'Andra [192] rappelle que l'augmentation de la température sur un milieu poreux peu perméable comme le COX engendre une surpression de l'eau porale induite par la différence de coefficient de dilatation thermique entre l'eau ($\sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$) et le squelette solide des argilites ($\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Cette surpression thermo-induite peut conduire à une fracturation de la roche, notamment dans les zones saines situées entre les alvéoles HA où la conductivité hydraulique, qui n'a pas été affectée par l'endommagement mécanique, est très faible.

L'Andra indique que, pour préserver les propriétés favorables des argilites, le dimensionnement thermique des quartiers HA doit respecter certains critères [192] :

- un critère thermique de 90°C maximum en tout point de la formation géologique et en peau de colis HA ;
- des critères thermo-hydomécaniques (THM) visant à maintenir le squelette solide de la roche en compression (critère de Rankine) et à limiter l'initiation d'un endommagement diffus ou une rupture en cisaillement (critère de Hoek et Brown).

L'Andra mène ce dimensionnement à l'aide de simulations numériques basées principalement sur un modèle thermo-poroélastique qui évalue des critères de rupture en contraintes effectives de Terzaghi. Les variables d'ajustement sont la durée de refroidissement des colis avant leur mise en stockage et l'espacement des colis et alvéoles au sein du quartier HA. À ce stade, l'Andra [192] indique que des entraxes entre alvéoles HA compris majoritairement entre environ 30 m et 60 m vérifient simultanément les critères thermique et THM.

Lors de l'examen du DOS, l'IRSN indiquait que les principaux mécanismes à prendre en compte pour dimensionner les quartiers HA étaient bien identifiés et soulignait le caractère dimensionnant du critère THM par rapport au critère purement thermique. Sur la base d'une étude paramétrique réalisée par l'Andra, l'IRSN considérait alors que l'entraxe nécessaire entre alvéoles pour des colis HA2 stockés après 85 ans d'entreposage était compris entre 35 et 80 m alors que l'Andra retenait 51 m, ce qui ne semblait pas laisser beaucoup de marge. L'Andra indiquait que de son point de vue, le dimensionnement des quartiers HA reposait sur une approche prudente fondée notamment sur la poroélasticité linéaire, et mentionnait un essai (CRQ – Comportement Représentatif d'un Quartier HA) en cours de définition au LSMHM pour vérifier et quantifier les marges dégagées par cette approche.

Au cours de la présente instruction, l'Andra [193] a précisé que l'expérimentation CRQ, mise en œuvre au LSMHM entre 2019 et 2020 via deux cycles de chauffe, a permis d'étudier le comportement THM du COX au-delà du domaine de fonctionnement attendu dans Cigéo et que, pour générer un état de contrainte en traction dans la roche, il a été nécessaire d'atteindre un niveau de pression interstitielle ($> 17 \text{ MPa}$) supérieur à ceux atteints jusqu'à présent. Malgré les difficultés techniques rencontrées, les premières observations confirment l'obtention d'une fracturation de la roche dans la zone où les modélisations numériques le prévoient. L'Andra envisage de poursuivre la modélisation de l'expérimentation dans le cadre du projet international DECOVALEX (<https://decovallex.org/>) avec des modèles constitutifs capables de reproduire l'initiation et la propagation de la fracturation, afin de connaître les niveaux de pression et de contraintes à partir desquels celles-ci se produisent. Par ailleurs, un deuxième essai CRQ a été initié au LSMHM en 2023 afin de confirmer les résultats obtenus en essayant de s'affranchir des difficultés expérimentales rencontrées lors du premier essai.

L'IRSN note que cette expérience confirme la possibilité d'utiliser une approche thermo-poroélastique pour évaluer les phénomènes THM dans les zones saines du COX situées entre les alvéoles HA jusqu'au moment de l'apparition d'une fracture. Elle montre également que la contrainte effective de Terzaghi est pertinente pour évaluer des critères de rupture dans ce contexte.

L'IRSN encourage l'Andra à poursuivre ces essais et efforts de modélisation, et estime que ces premiers résultats confirment la validité de la démarche de dimensionnement thermique adoptée.

6.4. Effets des perturbations transitoires chimiques sur les propriétés de transfert dans le Callovo-Oxfordien

L'analyse de l'IRSN sur l'effet des transitoires chimiques sur les propriétés de transfert dans le COX porte sur les trois familles de perturbations suivantes :

- la perturbation alcaline provenant des matériaux cimentaires ;
- la perturbation saline provenant des colis bitumés et des boues de STE2 ;
- la perturbation organique provenant des matrices de déchets bitumés, des colis contenant des polymères ainsi que des matériaux cimentaires contenant des adjuvants organiques.

L'IRSN aborde dans les trois sous parties suivantes chacune de ces perturbations et leurs conséquences en termes de propriétés de confinement hydraulique (K, De) et chimique (Kd, limite de solubilité) de la roche hôte. Une attention particulière est portée sur l'intensité et l'extension de ces perturbations.

6.4.1. Perturbation alcaline par les bétons des revêtements et soutènements

Les matériaux cimentaires présents dans l'installation souterraine Cigéo (cf. chapitre 7.2 du présent rapport) sont susceptibles de conduire à une perturbation dite « alcaline » de la roche hôte. L'étude de l'impact du panache alcalin sur la roche argileuse bénéficie de plus de 30 ans de recherche au niveau national et international, aboutissant à une bibliographie particulièrement riche. S'appuyant sur ces études et sur ses propres modélisations, l'Andra distingue, comme au stade du DOS, deux zones affectées par la perturbation alcaline [191]:

- une « zone reminéralisée » où les caractéristiques texturales, minéralogiques et géochimiques des argilites sont modifiées à proximité de l'interface avec le matériau (ou le fluide) cimentaire. Cette zone d'une épaisseur de l'ordre du mètre n'affecte qu'une partie de la ZFC (cf. chapitre 6.3 pour la définition de la ZFC) ;
- une « zone affectée par un panache alcalin sans reminéralisation » des argilites, d'extension plurimétrique, avec un pH accru (pH ~10) et une modification de la population de cations en position échangeable dans les feuillets des minéraux argileux. Cette zone englobe le reste de la ZFC et une partie de la ZFD.

Au stade du DOS, l'IRSN convenait que les principaux processus géochimiques régissant l'évolution des argilites sous un panache alcalin étaient bien identifiés et rappelait, comme indiqué lors de l'examen du dossier « Ouvrages de fermeture » en 2014 [22], que les ordres de grandeur d'extension de la perturbation alcaline retenus par l'Andra étaient cohérents avec les observations expérimentales et les modélisations effectuées par l'IRSN. L'IRSN précisait néanmoins qu'il convenait de rester prudent sur l'impact de ces transformations sur la structure de la roche et sur les propriétés de transport, notamment aux interfaces. En effet, l'IRSN soulignait, comme à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » et du dossier « Ouvrages de fermeture », que des incertitudes demeuraient concernant l'influence d'hétérogénéités sur la propagation de la perturbation alcaline. Dans le cadre du projet CEMTEX [194], l'IRSN avait observé que l'évolution des propriétés hydrodynamiques (microstructure notamment), fortement dépendante de la nature des interfaces et des hétérogénéités locales, peut conduire à des voies préférentielles de transfert parallèles à l'interface. Sur la base de ces remarques, l'Andra s'était engagée (2017-E-22)-à s'assurer que les propriétés de transport assignées aux zones d'argilites

endommagées (ZFC et ZFD) dans les scénarios d'évolution du stockage retenus dans le DDAC sont bien enveloppées des potentiels effets des différentes perturbations chimiques qui pourraient y prendre place.

Au stade du DDAC, l'Andra [143] considère que la perturbation alcaline provient essentiellement des bétons dits « classiques », majoritairement composés de ciment de Portland, utilisés pour les soutènements et revêtements (chapitre 7.2) et en contact avec la roche hôte. Concernant la « zone reminéralisée », l'Andra retient pour les valeurs de D_e un facteur multiplicatif de 5 pour la situation de référence du SEN et d'au moins un ordre de grandeur pour la situation enveloppe du SEN ($D_e = 8,1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) par rapport à la roche saine (valeur de référence de $7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et enveloppe de $3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$). Les valeurs de perméabilité retenues sont identiques à celles de toute la ZFC car « pilotées » par l'endommagement mécanique dû au creusement ; elles sont augmentées jusqu'à quatre ordres de grandeur par rapport à celles retenues au DOS⁶². Sur la base de ses propres études (e.g., [194][195]), **l'IRSN estime que les valeurs retenues par l'Andra pour les propriétés de transport dans la « zone reminéralisée » par la perturbation alcaline sont bien enveloppées des effets de cette perturbation.**

Concernant la « zone affectée par un panache alcalin sans reminéralisation », l'Andra considère que ses propriétés de transport ne sont pas modifiées par le panache alcalin et retient donc des valeurs identiques à la roche saine. Les travaux réalisés par l'IRSN [196][197] concluent également au caractère non reminéralisé de cette zone et sont donc **en accord avec cette conclusion.**

Ainsi, l'IRSN considère que l'impact physico-chimique du panache alcalin sur les propriétés de transport du COX pour l'évaluation de sûreté après fermeture est pris en compte de manière satisfaisante par l'Andra.

6.4.2. Perturbation saline par les déchets salins MA-VL

La solubilisation de sels, pour l'essentiel nitrates et sulfatés, issus de certains colis de déchets MA-VL (bitumes et boues de STE2 dont le conditionnement reste à définir) pourrait engendrer un gradient de salinité, moteur potentiel de flux, entre l'alvéole chargée en sels et la roche hôte, ainsi qu'une modification de la force ionique⁶³ de l'eau porale, qui pourrait conduire à une modification des propriétés de confinement du COX.

S'agissant du gradient de salinité engendré par le panache salin, l'Andra précise, comme au stade du DOS, qu'il peut conduire à d'autres mécanismes de transport que la diffusion, comme l'osmose chimique, susceptible d'accélérer la resaturation en eau du milieu, **ce dont l'IRSN convient.**

S'agissant de l'impact de la perturbation saline sur les propriétés de diffusion au sein du COX, l'Andra indique que l'augmentation de la teneur de l'eau porale en sels dissous pourrait altérer les propriétés de surface des minéraux argileux par une contraction de la double couche diffuse en surface des feuillettes d'argile. Ce processus conduit à une augmentation de la porosité accessible aux espèces anioniques les plus mobiles (Cl, I et Se) [198] et, par conséquent, l'Andra retient pour les anions un D_e équivalent à celui des espèces neutres pour la situation de référence et enveloppe du SEN. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Le mécanisme de rétention des cations par échange d'ions est particulièrement sensible à la force ionique due au panache salin [82], ce qui peut se traduire par une diminution des valeurs de K_d . Les effets sont moins marqués pour les espèces cationiques sensibles aux réactions de complexation de surface. Sur la base d'essais sur maquette [199] et de nombreuses données de la littérature [198] qui montrent ce phénomène, l'Andra a fait le choix de réduire d'un facteur 10 les valeurs de K_d retenues dans les situations de référence et enveloppe de l'évaluation de sûreté pour les espèces les plus sensibles au processus d'échange cationique (K, Cs, Rb, Be, Ca, Ra) en présence d'un panache salin. Concernant l'effet de la perturbation saline sur les limites de solubilité, des essais « batch » ont été réalisés par l'Andra en eaux synthétiques représentatives d'une eau porale enrichie en sels sur de l'illite (programme européen Catclay) et sur maquette avec des argilites du COX [198][199]. Sur la

⁶² Valeurs de référence : $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ au DOS, identique pour la DAC au droit des zones de scellements mais 10^{-9} au droit des alvéoles ; valeurs enveloppe : $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ au DOS, $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ au droit des zones de scellement et $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ au droit des alvéoles pour la DAC

⁶³ La force ionique est l'un des principaux facteurs influençant l'activité des ions en solution et est aussi un indicateur de la concentration totale en espèces dissoutes, e.g., eau de mer = 0,5 M

base des résultats obtenus, l'Andra retient un facteur correctif de 10 sur la limite de solubilité de certains éléments chimiques représentatifs des familles d'espèces cationiques (Mn, Cd, Pb, Sm, Pu, Ra, Mo, Hf, Pa, Ca, Am). Au-delà d'une force ionique d'1 M, les incertitudes sur la spéciation des radionucléides deviennent significatives et difficiles à modéliser avec les formalismes classiquement utilisés dans les codes géochimiques. A ce titre, l'IRSN relève que l'Andra considère pour l'évaluation de sûreté après fermeture des hypothèses très pénalisantes en considérant des limites de solubilité infinies et des valeurs de Kd nulles. **L'IRSN estime que les choix retenus par l'Andra pour les corrections appliquées aux paramètres de rétention et aux limites de solubilité sous l'effet d'un panache salin sont cohérents avec plusieurs essais représentatifs ainsi qu'avec la littérature scientifique disponible.**

Enfin, l'Andra a réalisé des modélisations en transport réactif sur 300 000 ans en conditions saturées dès la fermeture du stockage en supposant une libération immédiate des sels, en vue d'évaluer l'extension du panache salin. L'Andra a ainsi estimé une extension de quelques mètres au sein des argilites pour un seuil de force ionique de 0,2 M, et pouvant atteindre jusqu'à 15 mètres en l'absence de seuil au bout de 10 000 ans [53]. En effet, d'après l'Andra, la valeur maximale de la force ionique dans les argilites saines du COX est atteinte à 10 000 ans. Au-delà, la force ionique ne fait que diminuer. Après 300 000 ans celle-ci est proche de 0,05 M entre 0 et 25 m de profondeur. Sur la base de ses propres calculs, l'IRSN estime que ces ordres de grandeurs sont plausibles [200]. L'IRSN précise en outre que l'approche de l'Andra dans ses modélisations peut être considérée comme enveloppe car la plus grande partie des sulfates relâchés par les colis devrait rester immobilisée dans les conteneurs de stockage et les ouvrages en béton par précipitation minérale (formation d'ettringite).

En conclusion, **l'IRSN considère que l'évaluation de l'extension et de l'impact physico-chimique du panache salin sur les propriétés de transport, de rétention et de solubilité du COX présentée par l'Andra, qui s'appuie sur une base importante de données expérimentales et de modélisations, est pertinente.**

6.4.3. Perturbation organique par les déchets organiques MA-VL

Des composés organiques peuvent être présents dans les déchets ainsi que dans les matériaux constitutifs des colis primaires et des conteneurs de stockage, tels que les bitumes et les matériaux cimentaires⁶⁴. La dégradation de ces composés organiques, par effets chimiques, radiolytiques et/ou biologiques, est susceptible de générer une mise en solution d'espèces organiques complexantes. La formation de complexes stables en solution avec certains radionucléides pourrait alors induire une modification de leur mobilité, tant en milieu argileux que cimentaire. Il convient alors, d'une part d'évaluer l'impact de la perturbation organique dans l'environnement d'un alvéole riche en déchets organiques, d'autre part de s'assurer que l'extension de cette perturbation n'atteigne pas un alvéole adjacent possiblement d'inventaire radiologique différent.

Afin d'évaluer l'effet induit par la présence de molécules organiques sur la mobilité des radionucléides, l'Andra a, dans un premier temps, évalué le « terme source » en molécules organiques [81]. Pour cela, l'Andra a établi un inventaire de certaines substances organiques complexantes ainsi que des principales molécules organiques générées par la dégradation de différents polymères présents dans un grand nombre de déchets MA-VL (cellulose, PVC, polyuréthane, etc.), des matrices bitumées et des adjuvants cimentaires (cf. Tableau 8 ci-après) [82].

⁶⁴ Les composés organiques entrant dans la composition des matériaux cimentaires peuvent être des fibres ou des adjuvants tels que retardateurs ou accélérateurs de prise, plastifiants réducteurs d'eau, super plastifiants, etc.

Termes sources en molécules organiques	Substances organiques complexantes identifiées dans le terme source	Produits de dégradation complexants générés par radiolyse et/ou hydrolyse
Polymères : - matériaux cellulosiques - PVC - autres polymères type polyuréthane		- cellulose: acide iso-saccharinique (ISA) - PVC : acides phtalique et benzoïque - autres polymères : petits acides monocarboxyliques et dicarboxyliques
Matrices bitumées	Substances complexantes utilisées pour l'extraction des radionucléides, à propriétés de complexation élevées : tributylphosphate (TBP), citrate, acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA), oxalate, ascorbate, sulfamate, gluconate.	- principalement acides carboxyliques de faible poids moléculaire (majoritairement acides formique, acétique et oxalique) - produits de dégradation du TBP : DBP, MBP
Adjuvants cimentaires : superplastifiants (majoritairement des polycarboxylates estérifiés)		Différents acides carboxyliques (peu d'études associées)

Tableau 8. Termes sources en molécules organiques, substances organiques complexantes associées et produits de dégradation complexants identifiés par l'Andra [82]

Sur cette base, l'Andra considère un terme source organique dit « d'intérêt » ciblant un nombre limité de substances complexantes au regard de leur quantité dans l'inventaire et de leur pouvoir complexant en condition de stockage. L'Andra a ainsi retenu dans le cadre de ses études l'acide iso-saccharinique (ISA) produit par la dégradation de la cellulose, les phtalates relâchés lors de la dégradation du PVC et le tributylphosphate (TBP).

De manière générale, l'IRSN souligne les efforts entrepris par l'Andra pour identifier les termes sources en molécules organiques. En particulier, l'IRSN relève, en comparaison des travaux au stade du DOS de Cigéo, l'intégration du TBP au terme source organique d'intérêt, prenant ainsi en compte les caractéristiques des déchets des catégories physico-chimiques MA-VL1 et 2 (cf. chapitre 2.3.2 du présent rapport). De la même manière, l'IRSN considère pertinent le choix de retenir des produits de dégradation complexants issus de la dégradation de la cellulose et des phtalates relâchés lors de la dégradation du PVC compte tenu de leur quantité importante dans la catégorie de déchets MA-VL3 et du pouvoir complexant connu de ces espèces vis-à-vis de certains radionucléides. En revanche, s'agissant de l'influence des adjuvants organiques entrant dans la composition des matériaux cimentaires, l'IRSN rappelle que les essais conduits par l'Andra au stade du DOS montraient, pour certains d'entre eux, un impact significatif sur la rétention des radionucléides. L'Andra indique à cet égard que la cinétique lente de la dégradation chimique des matériaux cimentaires, couplée à la rétention des radionucléides par la matrice cimentaire, semble indiquer un effet limité des adjuvants cimentaires sur la migration des radionucléides, sans toutefois en apporter la démonstration malgré leur présence importante dans le stockage (colis primaires cimentés, conteneurs de stockage MA-VL en béton, ouvrages du stockage, etc.). Enfin, l'Andra précise que la biodégradation des acides carboxyliques en conditions biotiques peut conduire à la formation d'espèces organiques secondaires, dont la stabilité et les réactions de complexation n'ont pas encore été investiguées. **Aussi, l'IRSN encourage l'Andra à consolider les travaux d'identification des substances complexantes d'intérêt, en y intégrant des études relatives à l'influence des adjuvants cimentaires, de leurs produits de dégradation et de la biodégradation des acides carboxyliques au vu de leur importance potentielle sur la migration des radionucléides.**

Sur cette base, l'Andra a évalué la mobilité des molécules organiques d'intérêt et leurs effets sur celle des radionucléides, notamment l'uranium et le plutonium, dans et autour des alvéoles MA-VL [201]. Ainsi, pour

chaque famille MA-VL, l'Andra a sélectionné les familles de colis caractérisées par les inventaires les plus significatifs en déchets organiques :

- pour les MA-VL1, la famille de colis COG-430 contenant du TBP ;
- pour les MA-VL2, la famille de colis CEA-1020 (présente dans chaque alvéole MA-VL dédié au stockage des colis bitumés) contenant du TBP ;
- pour les MA-VL3, la famille de colis CEA-080 caractérisée par des teneurs maximales en ISA et phtalates, ainsi que la famille CEA-050, pour laquelle un stockage direct est partiellement envisagé.

L'IRSN relève que le choix des familles de colis caractérisés par les inventaires les plus significatifs en déchets organiques (MA-VL1, 2 et 3) est pertinent au vu des connaissances relatives à l'inventaire de référence de Cigéo. Néanmoins, eu égard à l'abandon par Orano du projet PIVIC pour la famille COG-400 en 2023 (cf. chapitre 3.2.3) et à la teneur importante de ces déchets en matière organique, **l'IRSN estime qu'il appartiendra à l'Andra, si aucun traitement des déchets de cette famille n'est mis en œuvre préalablement à leur conditionnement, d'intégrer ces déchets à l'étude des effets de la perturbation organique.**

Afin notamment de s'assurer que l'extension de la perturbation organique n'atteigne pas un alvéole adjacent, l'Andra modélise la mobilité des complexants organiques d'intérêt pris isolément en situation de référence et enveloppe du SEN. Les résultats des modélisations exprimés en profils de concentrations après un million d'année, durée maximale de la modélisation, montrent pour l'ISA, les phtalates et le TBP que les concentrations seuils⁶⁵ ne sont pas dépassées au-delà de 14 m, distance inférieure au demi-entraxe entre deux alvéoles (25 m) [201]. Afin d'évaluer l'impact de ces substances complexantes d'intérêt sur la mobilité des radionucléides, l'Andra a mené des études et modélisations sur la migration de l'U et du Pu en raison de leur sensibilité à la complexation et de l'inventaire important en actinides (déchets alpha) pour la famille de colis CEA-080. Les résultats montrent un faible effet de la présence d'ISA et de phtalates sur les distances de migration de l'U et du Pu (ces travaux ne portent pas sur le TBP). L'Andra explique ce résultat par l'effet prépondérant de la sorption de ces radionucléides dans les matériaux cimentaires sains ainsi que dans le COX (sain ou fracturé) par rapport à l'effet des complexants organiques.

Concernant les résultats de ces travaux menés par l'Andra, l'IRSN convient de la migration limitée des complexants organiques étudiés (ISA et phtalates en particulier) après un million d'années et de leur faible impact sur la migration de l'U et du Pu. Toutefois, l'IRSN souligne que l'Andra, à ce stade, considère uniquement des bétons sains en raison du manque de données permettant la modélisation géochimique de matériaux cimentaires dégradés en présence de molécules organiques. A cet égard, l'IRSN note des travaux en cours de l'Andra afin de prendre en compte l'état dégradé des matériaux cimentaires dans ses modélisations [81]. En outre, l'IRSN considère que l'étude de l'impact du panache de complexant organique sur la migration des radionucléides mériterait d'être étendue à des complexants organiques autre que l'ISA ou les phtalates. Ainsi, les systèmes EDTA/Th(IV) ou TBP/U(IV) pourraient être étudiés en raison de leur pouvoir complexant spécifique susceptible d'avoir un impact sur leur mobilité. **Aussi, l'IRSN encourage l'Andra à poursuivre ces travaux pour confirmer ces résultats en intégrant les propriétés de rétention des matériaux cimentaires dégradés, ainsi qu'en prenant en compte l'effet d'autres espèces complexantes telles que le TBP et l'EDTA sur la migration des radionucléides.**

S'agissant de l'impact d'un « cocktail » d'espèces organiques complexantes sur la migration des radionucléides, l'IRSN relève, en comparaison des travaux au stade du DOS de Cigéo, la mise en œuvre d'études de rétention conjointe de molécules organiques dans le COX et dans des matériaux cimentaires. Les résultats de ces études montrent que la présence conjointe d'ISA, de phtalates et d'EDTA dans le COX diminue leur sorption respective dans cet environnement d'un facteur 3 pour des concentrations égales à 10^{-2} mol.L⁻¹. De la même manière, la présence conjointe d'ISA, d'adipate et de phtalate dans un matériau cimentaire (pâte de ciment CEM V hydraté)

⁶⁵ Concentration définie par l'Andra à partir de laquelle les effets du complexant sur les propriétés de rétention des radionucléides (actinides) sont dits significatifs.

entraîne également une diminution de leurs sorption respective, jusqu'à un ordre de grandeur, dans ce milieu. L'IRSN estime que ces nouvelles études constituent une première étape permettant d'identifier des complexants organiques en compétition vis-à-vis de leur sorption et encourage l'Andra à poursuivre ces évaluations en présence de radionucléides.

En conclusion, compte tenu de l'ensemble des éléments présentés ci-avant, l'IRSN convient qu'à ce stade les résultats d'évaluation de l'impact des composés organiques sur la migration des radionucléides tendent à montrer que celui-ci est faible.

6.5. Propriétés initiales et évolution des matériaux de remblais

Les matériaux que l'Andra prévoit d'utiliser pour le remblaiement des ouvrages souterrains et des liaisons surface-fond sont principalement constitués d'argilites du COX excavé, remaniées et reconditionnées. Ces remblais ont pour fonction de sûreté après fermeture de préserver les caractéristiques favorables de la roche hôte, en particulier vis-à-vis du sur-endommagement lié au foisonnement (cf. chapitre 6.3.4) en limitant les vides des galeries et des descenderies. En outre, ils doivent favoriser la migration de l'hydrogène gazeux dans les ouvrages afin d'éviter que la pression de gaz ne conduise à une fracturation du COX (cf. chapitre 6.2).

Au stade du DDAC, l'Andra prévoit de placer des remblais sur tout le linéaire des parties courantes des galeries et LSF, ainsi qu'aux extrémités des alvéoles de stockage de déchets MA-VL, de la galerie de liaison à la cellule de manutention, puis du fond de l'alvéole jusqu'à la galerie de retour d'air. Les argilites excavées du COX, qui constituent l'essentiel des remblais, conservent une capacité de gonflement qui leur permet de participer à la fermeture progressive des vides résiduels, ainsi qu'une perméabilité à l'eau plus élevée que celle des noyaux de scellements, qui leur permet de faciliter la resaturation de ces derniers. L'Andra prévoit de combiner, si besoin, ces argilites avec des additifs (sable, chaux, bentonite) pour renforcer les caractéristiques hydrauliques et hydromécaniques du matériau de remblai [143][202][81].

Pour étudier les propriétés des remblais, l'Andra a mené divers essais sur des argilites provenant de carottes de forages, des verses du LSMHM, ou encore des affleurements naturels du COX au Manois (à 25 km au sud du LSMHM). L'Andra a également réalisé un démonstrateur de remblaiement de galerie avec réemploi du « marin » du COX, à Richwiller (68) entre 2004 et 2006. Sur la base de ces résultats, l'Andra retient un protocole de préparation des argiles remaniées en deux étapes, classiques du remblaiement d'ouvrages souterrains, consistant à amener l'argile brute à la granulométrie et à la teneur en eau désirées dans un premier temps, puis à compacter le matériau de remblai avec ou sans additif (sable, chaux et bentonite) pour atteindre la masse volumique sèche ciblée. Au travers de différents essais, l'Andra a montré que l'ajout de sable permet d'augmenter la conductivité hydraulique alors que celui de chaux ou de bentonite permet de la diminuer, par réduction de la microporosité pour la chaux et par gonflement pour la bentonite.

L'IRSN note à ce stade que l'Andra n'attribue aucune propriété de rétention à ces matériaux, ce qui est conservatif car les argilites, malgré leur vieillissement, devraient garder une certaine capacité de sorption. De même, les paramètres de transport diffusifs retenus par l'Andra (coefficients de diffusion de pore équivalents à ceux de l'eau libre et porosité totale élevée) sont pénalisants. Par ailleurs, l'IRSN souligne que l'atteinte d'une perméabilité au gaz et à l'eau plus élevée que celle des scellements devrait être accessible. Cependant, l'IRSN estime que le maintien d'une perméabilité au gaz qui permettrait sa migration via les galeries de liaison et jusqu'aux scellements, qui sera lié à l'état hydrique du remblai, mérite un point d'attention particulier.

A cet égard, l'Andra a réalisé des premiers essais sur échantillons (carottes du COX, verses du COX issues du creusement du LSMHM, argilites de Manois et tests de différents matériaux additifs) [81][203]) ainsi qu'un essai de faisabilité de remblayage d'une galerie avec des argilites excavées, mené à Richwiller. L'IRSN estime que les résultats de ces premiers essais permettent d'identifier les propriétés que peut apporter chaque matériau à la composition des remblais ainsi que de retenir des premières pistes de mise en place de ces remblais. En outre, l'Andra a défini un programme de recherche ambitieux à conduire durant la phase pilote [135], comprenant des essais à différentes échelles spatiales et temporelles, ainsi qu'un démonstrateur de REmbliement de Galerie

(REG). Ce programme vise à préciser le domaine de composition des matériaux, à conforter la faisabilité de la mise en place d'un remblai, à vérifier l'atteinte des performances attendues et à réaliser des modélisations multiphysiques incluant le couplage des processus HMC-gaz. **L'IRSN considère que le programme de recherche sur les remblais, que l'Andra prévoit de mettre en œuvre en vue du bilan de la phase pilote, est globalement pertinent.** Pour la phase pilote et au-delà, l'Andra prévoit également une veille sur d'autres matériaux de remblai possibles, tels que des graves ou du concassé calcaire, comme alternative aux argiles excavées du COX. L'IRSN estime que l'Andra pourrait effectivement tirer bénéfice de la recherche de solutions alternatives compatibles avec une gamme de matériaux plus diversifiés et l'encourage à poursuivre ses investigations sur d'autres matériaux.

7. ÉVOLUTION DES COLIS, DES MATERIAUX CIMENTAIRES ET METALLIQUES

7.1. Évolution des colis après fermeture du stockage

La connaissance de la phénoménologie d'évolution des colis de déchets radioactifs, sur laquelle l'Andra s'appuie pour établir et paramétrer les modèles de relâchement des radionucléides des différentes familles de colis primaires, n'a pas évolué significativement depuis l'examen du DOS de Cigéo. Son analyse a été présentée de manière détaillée dans le rapport de l'IRSN relatif à l'examen du DOS de Cigéo [30]. Ces éléments sont synthétisés ci-après et complétés par l'examen des éléments précisés ou apportés par l'Andra dans le DDAC.

Les référentiels de connaissance du DDAC [165][204][205][206] présentent l'ensemble des connaissances réunies par l'Andra sur le comportement des colis de déchets. Comme au stade du DOS, ces connaissances servent de base à la description phénoménologique du relâchement des radionucléides, par type de matériau (matériaux métalliques, verres, etc.) [207]. Sur la base de cette description ainsi que des informations fournies par les producteurs sur les différentes familles de colis, l'Andra a établi des modèles de comportement par familles ou sous-familles de colis [208]. Enfin, à partir de ces modèles par familles, l'Andra a établi les modèles de relâchement des radionucléides sur lesquels s'appuie *in fine* l'évaluation de sûreté après fermeture, en distinguant les modèles retenus dans les situations de référence et enveloppe du SEN⁴⁵ [143] (cf. Annexe T18). Concernant les colis pour lesquels il n'existe à ce jour aucun modèle, ainsi que ceux pour lesquels les modèles existants comportent trop d'incertitudes ou sont difficilement paramétrables en conditions de stockage, un modèle dit « labile » est retenu, qui consiste en un relâchement instantané des radionucléides dès l'arrivée de l'eau au contact des déchets.

7.1.1. Déchets salins

Les déchets salins non bitumés, contenant des sels immobilisant les radionucléides, correspondent à la famille COG-430 (boues de STE2) dont le conditionnement est à définir. Les éléments phénoménologiques présentés dans le DDAC sont relatifs à un conditionnement en colis C5, aujourd'hui abandonné (voir chapitre 3.2.3), et conduisent l'Andra à envisager un modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels [208]. Toutefois, en pratique, l'Andra retient un modèle de relâchement labile en vue des évaluations de sûreté, **ce qui est satisfaisant**. Il appartiendra à l'Andra de mettre à jour ses modèles en fonction du mode de conditionnement qui sera *in fine* retenu par le producteur.

Les déchets salins bitumés sont des boues de coprécipitation séchées, enrobées dans une matrice de bitume puis conditionnées dans des fûts en acier. Ces boues contiennent des sels de même nature que les déchets salins non bitumés : environ 80 % de sels insolubles (BaSO_4 , CoS , etc.), immobilisant la majeure partie des radionucléides, le reste étant des sels solubles (NaNO_3 , Na_2SO_4 , etc.). Les éléments phénoménologiques présentés dans le DDAC sont applicables dans le cas d'un stockage en l'état de ces déchets [207]. L'IRSN rappelle à cet égard que, si un traitement visant à neutraliser la réactivité des déchets bitumés était mis en œuvre (voir chapitre 3.2.3), d'autres modèles de relâchement devraient être établis.

L'évolution à long terme des déchets bitumés est pilotée en premier lieu par l'évolution sous eau de la matrice, dans les conditions attendues d'un alvéole MA-VL resaturé. Les mécanismes considérés par l'Andra sont :

- l'adsorption des molécules d'eau à la surface du bitume ;
- la diffusion de l'eau dans le bitume ;
- la reprise d'eau par les sels et leur solubilisation dès que l'activité chimique de l'eau dans le bitume atteint une valeur seuil ; en deçà de cette valeur seuil, aucune reprise d'eau par les sels n'est attendue ;
- le gonflement local autour des sels solubles dû à la formation de poches de solutions salines ;

- la formation d'une zone de matrice bitumineuse perméable à toutes les espèces (appelée zone altérée ou perméable) ;
- le relâchement des sels solubles (par transfert dans la zone perméable selon un phénomène diffusif), des sels peu solubles et des radionucléides (par transfert diffusif mais limité par leur concentration à saturation dans la zone perméable).

L'Andra retient deux approches pour établir le modèle de relâchement des radionucléides depuis les déchets salins bitumés : la première est basée sur la modélisation de tout ou partie des phénomènes précités à l'aide du code de calcul COLONBO et la seconde, considérée dans le cas où le modèle COLONBO n'est pas applicable, consiste en un relâchement des radionucléides uniquement piloté par la solubilité des sels solubles.

Le modèle de relâchement COLONBO prend en compte la capacité du bitume à limiter la mise en solution des radionucléides. L'Andra présente plusieurs « cas » du modèle COLONBO, correspondant à différentes options de modélisation. Toutefois, l'Andra ne retenant que le « cas dégradé » du modèle COLONBO dans ses évaluations de sûreté, seul celui-ci est présenté ci-après. Dans ce cas, la cinétique de relâchement des radionucléides ne dépend que de la cinétique d'altération du bitume au contact de l'eau, et ne tient pas compte, par exemple, d'une limitation du relâchement des radionucléides ou sels peu solubles par leur solubilité. Le relâchement depuis la zone perméable est considéré instantané et son ampleur est pilotée par la solubilité du NaNO_3 , auquel est associée l'intégralité des radionucléides. La cinétique de formation de la zone perméable est liée à la diffusion de l'eau dans le bitume qui, dans un modèle de diffusion classique (de type loi de Fick), est linéairement dépendante de la racine carrée du temps. L'avancée du front de dissolution de NaNO_3 ne dépend donc dans ce modèle que de l'activité chimique de l'eau d'une solution composée de ces sels solubles et du coefficient de diffusion effectif de l'eau dans la zone perméable formée par la dissolution de ces sels. L'Andra indique que l'applicabilité de ce modèle présente des restrictions :

- l'existence de colis de déchets bitumés dont la teneur massique en sels solubles sort du domaine de validité (2 % à 22 %⁶⁶) ;
- la possible remise en cause de la linéarité à la racine carrée du temps, en particulier liée à la microfissuration dans la surface des enrobés, qui a été observée sur des essais, ou la non prise en compte de la présence de bulles de gaz qui peuvent offrir un chemin préférentiel au transfert gravitaire de l'eau au sein de la matrice, plus rapide que par diffusion, en cas de coalescence de ces bulles. L'IRSN souligne à cet égard que l'auto-irradiation de la matrice bitumineuse peut conduire à la formation de chemins préférentiels supplémentaires, par fracturation de celle-ci.

A cet égard, l'Andra a présenté au cours de l'instruction des résultats de comparaison entre calculs et résultats expérimentaux de lixiviation d'un enrobé de STE3, montrant le caractère enveloppe du cas dégradé du modèle COLONBO, notamment vis-à-vis des comportements atypiques induits par la microfissuration.

Par ailleurs, l'Andra précise que le modèle COLONBO suppose le maintien de la géométrie de l'enrobé bitumé, et donc une intégrité du colis primaire et du conteneur de stockage en béton. L'Andra fait l'hypothèse que cette géométrie est maintenue pendant 1 000 ans, durée pendant laquelle il n'est pas attendu de modification de la géométrie du colis primaire. L'Andra a précisé au cours de l'instruction que la durée d'intégrité du conteneur de stockage avait été considérée en lien avec les temps caractéristiques de l'évolution mécanique de l'alvéole et des conteneurs de stockage MA-VL en béton (mise en charge progressive des conteneurs estimée à partir de quelques dizaines de milliers d'années).

Comme indiqué à l'issue de l'expertise du DOS de Cigéo, l'IRSN estime que l'hypothèse du modèle COLONBO selon laquelle tous les radionucléides sont associés au sel soluble NaNO_3 donne un caractère conservatif au terme source radiologique issu de la zone perméable de la matrice bitumineuse. En effet, le NaNO_3 est le sel possédant la solubilité la plus élevée. L'IRSN convient également de l'hypothèse d'une durée de 1 000 ans pour le maintien

⁶⁶ 22 % correspond à la borne haute des teneurs en sels solubles des échantillons ayant pu être réalisés par le CEA pour valider la phénoménologie sur laquelle se base le modèle COLONBO.

de la géométrie de l'enrobé bitumé. En revanche, l'IRSN partage avec l'Andra les limites mentionnées *supra* sur l'applicabilité du modèle, en particulier concernant la présence de chemins préférentiels (fracturation de la matrice bitumée et bulles de gaz coalescées) pour le transfert de l'eau au sein de la matrice. A cet égard, l'IRSN note que les résultats complémentaires présentés par l'Andra visant à montrer le caractère enveloppe du modèle ne concernent que deux essais sur des enrobés de STE3, dont la représentativité n'est pas garantie, eu égard à la variabilité des colis de déchets bitumés (activité radiologique, présence d'inhibiteurs de radiolyse, etc.). Aussi, **l'IRSN estime que ces essais ne sont pas suffisants pour confirmer le caractère représentatif du modèle COLONBO vis-à-vis de la possible présence de chemins préférentiels dans la matrice bitumée.**

Le modèle basé sur la solubilité des sels postule que tous les radionucléides sont associés au NaNO_3 , supposé représenter l'ensemble des sels solubles, sans tenir compte de la cinétique d'altération de la matrice du bitume. L'Andra a récemment mené des études montrant que la solubilité du NaNO_3 n'évolue pas significativement entre un pH de 7 et un pH de 13,5, ce qui est satisfaisant. **Aussi, l'IRSN considère que ce modèle décrit de manière conservatrice le relâchement des radionucléides depuis les colis de déchets salins bitumés.**

In fine, dans la situation de référence du SEN, l'Andra retient le modèle COLONBO pour les colis dont la teneur en sels solubles est compatible avec la gamme de validité du modèle, tant que la géométrie du colis est maintenue (1 000 ans) [143]. Au-delà, le modèle reposant uniquement sur la solubilité des sels solubles est appliqué. Pour les colis dont les teneurs en sels solubles n'entrent pas dans le domaine de validité du modèle COLONBO, le modèle reposant uniquement sur la solubilité des sels solubles est directement appliqué après fermeture. En situation enveloppe du SEN, pour prendre en compte les incertitudes résiduelles sur le domaine d'applicabilité du modèle COLONBO, seul le modèle basé sur la solubilité des sels est retenu dès la fermeture. Un modèle de relâchement labile est par ailleurs appliqué pour les colis de quelques sous-familles, présentant des spécificités (fûts expérimentaux, présence de thermocouples, etc.).

En conclusion, l'IRSN considère, eu égard au conservatisme du modèle basé sur la solubilité du NaNO_3 , que l'application de ce modèle en situation enveloppe du SEN est satisfaisante. Il appartiendra à l'Andra, sur la base de la contribution des colis de déchets bitumés à l'impact radiologique de Cigéo après sa fermeture, de juger de l'intérêt de poursuivre les études sur le modèle COLONBO afin de lever les incertitudes résiduelles.

7.1.2. Déchets métalliques

Les colis de déchets métalliques sont principalement constitués de déchets de structure issus des parties métalliques des assemblages combustibles ou de déchets provenant d'éléments activés en réacteur, ainsi que de déchets technologiques de natures diverses. Deux modes de conditionnement sont actuellement utilisés pour ces déchets : le compactage suivi d'un conditionnement en colis CSD-C ou le blocage dans une matrice cimentaire suivi d'un conditionnement en conteneur métallique ou béton (par exemple, colis C1PG^{SP}). Les métaux présents dans ces déchets sont des alliages de zirconium, de l'acier inoxydable ou non allié, des alliages de nickel, etc. Une grande part de l'inventaire radiologique des déchets métalliques est constituée de produits d'activation. Le reste de l'inventaire radiologique correspond à des produits de fission, ainsi qu'aux actinides qui n'ont pu être récupérés par les opérations de traitement des combustibles usés. En stockage, les radionucléides provenant de l'activation des éléments constitutifs des différents alliages métalliques ne peuvent être relâchés préalablement à l'altération des pièces par corrosion.

L'Andra retient deux modèles de relâchement :

- un modèle par corrosion généralisée dit « conservatif », qui néglige l'effet de la couche de passivation, pour une partie de l'inventaire en colis CSD-C (issus du traitement de combustibles UOX et de mélange UOX/URE/MOX). Pour ce qui concerne les épaisseurs des pièces, l'Andra retient pour les alliages de zirconium l'épaisseur des coques ;
- un modèle labile pour le reste de l'inventaire en colis CSD-C (CSD-C HAO, CSD-C issus du traitement de combustibles du CEA, etc.) et les déchets métalliques cimentés, du fait de l'absence de dossiers de connaissances à ce stade ou de diverses incertitudes (présence de matière organique, épaisseur des

pièces, risque de couplage galvanique, etc.). Ce modèle labile est également retenu pour les fines de cisailage et les éclats inframillimétriques, ainsi que pour les radionucléides en contamination surfacique, ceux situés dans la zircone et dans les alliages métalliques, de l'inventaire des colis CSD-C mentionnés au premier alinéa.

Les vitesses de corrosion retenues par l'Andra pour le premier modèle sont issues d'essais réalisés dans des conditions proches de celles attendues en stockage (pH compris entre 9 pour le long terme et 12,5 à 13,5 pour le court terme, conditions anoxiques, température entre 25°C et 50°C, présence de chlorure, etc.), sur quelques années. Eu égard au programme expérimental mené par l'Andra dans des conditions représentatives du stockage et aux hypothèses conservatives retenues (non prise en compte de la couche de passivation, épaisseurs des pièces pénalisantes, etc.), **l'IRSN estime que le modèle de relâchement basé sur la corrosion généralisée retenu par l'Andra pour une partie de l'inventaire en colis CSD-C est applicable. Le choix de retenir un modèle de relâchement labile pour le reste de l'inventaire des déchets métalliques, compte-tenu des incertitudes existantes, est satisfaisant.**



7.1.3. Déchets vitrifiés

Les déchets vitrifiés HA, principalement constitués de solutions issues du traitement des combustibles usés, proviennent des usines d'Orano à La Hague et du CEA à Marcoule. D'autres déchets, provenant par exemple d'opérations de vidange de fours de vitrification, sont également vitrifiés. Les familles de colis vitrifiés HA diffèrent notamment par la nature des solutions conditionnées, les caractéristiques des verres produits et le type de conteneur primaire. Les déchets vitrifiés MA-VL proviennent quant à eux de la vitrification d'effluents MA-VL produits par exemple lors d'opérations de rinçage.

Le comportement intrinsèque du verre, lié aux phénomènes de cristallisation et d'auto-irradiation ainsi qu'aux contraintes thermo-mécaniques emmagasinées lors de l'élaboration du verre aboutissant à une fracturation de celui-ci, a fait l'objet d'une description détaillée et d'une analyse dans le rapport de l'IRSN relatif à l'examen du DOS de Cigéo [30]. Les éléments présentés par l'Andra dans le DDAC [207] sont similaires à ceux présentés par l'Andra dans le DOS et, comme à l'issue de l'expertise de ce dernier, n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.

La phénoménologie d'altération des déchets vitrifiés en conditions de stockage a également fait l'objet d'une description exhaustive dans le rapport de l'IRSN relatif à l'examen du DOS [30], au cours duquel l'Andra avait pris l'engagement de présenter dans le DDAC « *les résultats des développements et acquisitions de données pour l'établissement des modèles de relâchement des colis de déchets vitrifiés HA, en particulier ceux visant à : (i) préciser l'influence des matériaux d'environnement sur la phénoménologie d'altération des verres, notamment pour ce qui concerne le passage d'un régime de vitesse initiale à un régime de vitesse résiduelle ; (ii) prendre en compte l'évolution des exigences de température au cœur du verre au moment de l'arrivée de l'eau ; (iii) améliorer la compréhension des phénomènes d'altération des verres par la vapeur d'eau et de l'impact de celle-ci sur l'altération ultérieure sous eau ; (iv) démontrer l'absence d'effet défavorable du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage en acier des alvéoles HA sur le comportement à long terme des déchets vitrifiés* » (engagement 2017-E-17). Quelques éléments de phénoménologie sont rappelés ci-après [207], puis les réponses apportées par l'Andra à l'engagement 2017-E-17 sont examinées.

Dès la perte d'étanchéité du conteneur de stockage, l'eau altère le verre, ce qui conduit au relâchement des radionucléides. Dans un premier temps, le verre s'altère à une vitesse initiale V_0 , dépendante de la température et du pH, et l'eau pénètre dans le réseau vitreux selon un processus d'hydratation. En parallèle, se produit l'hydrolyse du réseau vitreux qui pilote l'altération du verre, à l'interface couche hydratée/solution. Une diminution de la vitesse d'altération est ensuite observée, qui s'explique par l'atteinte de conditions de saturation en silicium de la solution, conduisant à la formation d'une pellicule d'altération qui joue le rôle d'une barrière (gel protecteur). Dans un troisième temps, l'altération du verre se poursuit à une vitesse stabilisée moins élevée, dite vitesse résiduelle V_R , dépendante des conditions d'environnement. Ce régime est contrôlé par la

diffusion de l'eau et des espèces réactives au sein de la pellicule d'altération et la précipitation de phases secondaires qui entretiennent l'altération du verre.

Dans le cadre du DDAC, l'Andra a présenté les premiers résultats liés aux études en cours sur :

- l'influence de l'environnement sur le transitoire entre les deux régimes (V_0 et V_R), en particulier concernant l'interaction du silicium avec des matériaux capables de coprécipiter (fer, magnésium) ;
- les vitesses d'altération des verres à une température de 70°C, retenue depuis le DOS comme exigence de température à cœur des colis HA1/HA2 lors de l'arrivée d'eau ;
- l'influence du MREA.

Ces études ont notamment permis de préciser l'influence de la formation de silicates de fer sur la durée du transitoire V_0/V_R et ont par ailleurs mis en évidence des incertitudes liées à la représentativité des différentes expériences réalisées vis-à-vis des conditions d'environnement en stockage (température, espèces présentes, taux de renouvellement associés, etc.). A cet égard, l'Andra prévoit de poursuivre ses études sur l'altération des verres, dans des conditions représentatives du stockage. En particulier, s'agissant de l'influence du MREA sur l'altération des verres, l'Andra prévoit de réaliser des essais à 70°C, contre 50°C jusqu'à présent, afin de respecter les exigences de température lors de l'arrivée de l'eau au contact des déchets vitrifiés. **L'IRSN encourage l'Andra à poursuivre ces recherches, dans l'objectif d'améliorer la représentativité des essais vis-à-vis des conditions en stockage, en termes de température ainsi que d'espèces présentes à proximité des verres et de leur taux de renouvellement, incluant celles issues du MREA dont la formulation n'est pas arrêtée à ce jour (cf. chapitre 7.3).**

Par ailleurs, l'Andra a également étudié les phénomènes d'altération de la matrice vitreuse sous vapeur d'eau. Les résultats obtenus montrent que la vitesse d'hydratation diminue dans le temps pour atteindre une valeur inférieure à la vitesse initiale d'altération du verre en eau pure mais supérieure à la vitesse résiduelle mesurée en eau pure. Ainsi, lorsqu'un verre préalablement hydraté sous vapeur d'eau est altéré sous eau, les vitesses d'altération observées par l'Andra sont plus importantes que celles mesurées pour un verre qui n'aurait pas été préalablement hydraté, ce qui engendre un relâchement plus important à partir de la zone de verre préalablement altérée sous phase vapeur. **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

En outre, des publications récentes [209][210][211][212] mettent en évidence, dans certaines conditions (conditions d'environnement oxydantes en milieu non saturé en eau, représentatives du stockage de Yucca Mountain), des mécanismes synergiques d'altération du verre et de corrosion de l'acier inoxydable. Ainsi, la corrosion localisée (corrosion caverneuse ou par piqûre) des aciers inoxydables pourrait conduire à des micro-environnements très acides ou très basiques qui augmentent, localement et significativement, l'altération du verre. A cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que de tels mécanismes n'étaient pas attendus à Cigéo après sa fermeture. L'Andra estime en effet que, dans le cas de Cigéo, les conteneurs primaires de déchets vitrifiés en acier inoxydable ne pourront se corroder qu'après perte d'étanchéité du conteneur de stockage, lorsque les conditions d'environnement seront redevenues anoxiques, et qu'aucune corrosion localisée par piqûre ou par corrosion caverneuse n'est attendue dans un tel milieu, dans la mesure où l'ensemble des essais réalisés au LSMHM sur des échantillons de verre placés dans des micro-conteneurs en acier inoxydable ne montrent à ce stade pas de phénomène de corrosion localisée. S'agissant de la possible formation d'espèces oxydantes par radiolyse susceptibles d'engendrer des phénomènes de corrosion localisée [210], l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le caractère homogène de la radiolyse entraînait une faible probabilité d'occurrence des phénomènes de corrosion localisée. A cet égard, l'IRSN convient du caractère peu probable d'une corrosion localisée du conteneur primaire en acier inoxydable avant la perte d'étanchéité du conteneur de stockage, mais estime que les effets potentiels de la radiolyse ne peuvent toutefois pas être exclus à ce stade sans évaluation plus poussée. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué poursuivre une veille sur l'altération des déchets vitrifiés intégrant les effets synergiques d'altération verre-acier inoxydable. **L'IRSN considère que cette action est suffisante dans la mesure où la situation décrite paraît peu probable et est couverte par le modèle de relâchement labile retenu dans les scénarios d'évolution altérée qui considèrent la perte prématurée d'étanchéité de tout ou partie des conteneurs de stockage HA.**

S'agissant des modèles de relâchement, l'Andra retient pour la situation de référence du SEN, comme au stade du DOS, trois modèles en fonction du niveau de connaissances des déchets et de leur phénoménologie d'altération [143] :

- le modèle « $V_0 \rightarrow V_R$ », fondé sur l'atteinte d'une vitesse résiduelle, pour la plupart des familles de déchets vitrifiés HA (notamment les verres de composition R7/T7 et AVM) et une famille MA-VL (effluents vitrifiés de Marcoule) ;
- le modèle « V_0 », fondé uniquement sur la vitesse initiale, pour les familles de colis pour lesquelles l'atteinte d'une vitesse résiduelle n'a pas été observée ou pour lesquelles les données disponibles ne sont pas suffisantes. Il s'agit notamment des familles HA de conteneurs PIVER, des verres UMo et de quelques sous-familles de conteneurs AVM, ainsi que de familles MA-VL (effluents vitrifiés de Valduc et colis CSD-B) ;
- le modèle labile pour les familles de colis présentant une faible résistance à la lixiviation ou pour lesquelles les données disponibles ne permettent pas de paramétrer un modèle. Il s'agit notamment des familles HA de déchets vitrifiés divers, de reliquats de verres UMo et de sous-familles de verres de vidange R7/T7 et de calcinat, ainsi que d'une famille MA-VL (CSD-RB).

En situation enveloppe du SEN, seuls les modèles « V_0 » et labiles sont retenus, afin de prendre en compte l'ensemble des incertitudes relatives à l'application du modèle « $V_0 \rightarrow V_R$ », en particulier celles relatives à l'impact des matériaux d'environnement à long-terme.

L'IRSN relève que les principales évolutions dans les modèles de relâchement retenus pour le DDAC concernent l'acquisition et la mise à jour des valeurs de certains paramètres permettant de prendre en compte les conditions environnementales (par exemple, facteurs traduisant l'effet de l'eau de site sur la vitesse d'altération). Aussi, comme au stade du DOS, **l'IRSN estime que les modèles de relâchement des déchets vitrifiés HA et MA-VL en milieu argileux retenus par l'Andra sont cohérents avec l'état des connaissances actuelles. De manière générale, le choix des paramètres associés aux modèles de relâchement apparaît pertinent à ce stade.** L'IRSN rappelle toutefois que ces paramètres devront être confirmés au regard des études en cours et le cas échéant ajustés, notamment en fonction du choix définitif de formulation du MREA.

7.1.4. Autres déchets de l'inventaire de référence

Pour les déchets HA non vitrifiés (voir chapitre 3.2.2), l'Andra retient un modèle de relâchement labile [143], ainsi que pour les déchets MA-VL non décrits dans les chapitres ci-avant (soit une soixantaine de familles), comme les colis 870 L et 500 L du CEA, divers déchets irradiants, les déchets d'ITER, etc. Compte tenu d'une part, de la connaissance parfois limitée sur ces colis de déchets, en particulier pour les colis dont le conditionnement reste à définir et d'autre part, des incertitudes sur leur comportement à long terme, **le choix d'un relâchement labile pour ces déchets n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

7.1.5. Déchets de l'inventaire de réserve

Déchets FA-VL

L'Andra indique que des analogies pourraient être retenues pour établir le modèle de relâchement associé à certaines familles de déchets FA-VL (par exemple entre les bitumes MA-VL et FA-VL) et que des études spécifiques ont par ailleurs été menées (par exemple, sur le relâchement de ^{36}Cl et de ^{14}C des empilements de graphite). Par souci de simplification et de conservatisme, l'Andra utilise toutefois dans le SEN « adaptabilité »⁶⁷ un modèle de relâchement labile pour l'ensemble des déchets FA-VL. **L'IRSN considère que ce choix d'un modèle de relâchement labile pour l'ensemble des déchets FA-VL est approprié à ce stade, eu égard aux incertitudes sur leur comportement et à leur faible contribution à l'inventaire radiologique.**

⁶⁷ Scénario d'évolution normale intégrant les colis de déchets de l'inventaire de référence et de réserve, qui se décline en situation de référence et en situation enveloppe.

Combustibles usés

Les combustibles usés sont composés d'alliages métalliques (structure des assemblages) et de matrices combustibles, qui sont pris en compte *via* des modèles de relâchement respectifs [62]. Pour les alliages métalliques activés, l'Andra considère un relâchement des produits d'activation des éléments de structure corrélé à la corrosion de ces matériaux. En particulier, pour les combustibles usés UOX et MOX, l'Andra retient :

- pour les éléments constitués d'alliages de zirconium, une vitesse de corrosion de 5 nm/an pour la situation de référence du SEN adaptabilité et de 20 nm/an pour la situation enveloppe ;
- pour les éléments constitués d'acier inoxydable ou d'alliage de nickel, une vitesse de corrosion de 70 nm/an pour la situation de référence du SEN adaptabilité et de 0,3 µm/an pour la situation enveloppe.

Pour tenir compte de l'incertitude sur l'épaisseur des pièces métalliques, l'Andra suppose que toute l'activité est concentrée sur les plus petites pièces de l'alliage. Un modèle labile est par ailleurs associé aux combustibles pour lesquels les connaissances ne permettent pas de paramétrer un modèle de relâchement associé aux matériaux de structure. **Le modèle de relâchement associé aux éléments de structure, basé sur l'état de l'art de la corrosion des alliages métalliques lorsque les connaissances sont suffisantes [213][214], n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

Pour les matrices combustibles, l'Andra retient, comme au stade du DOS un modèle de relâchement en deux phases :

- un relâchement labile des radionucléides localisés dans les zones des crayons dont la capacité de confinement n'est pas démontrée, au moment de l'arrivée de l'eau dans l'élément combustible (IRF, pour *Instant fraction release*) ;
- un relâchement différé des radionucléides localisés dans la matrice, relâchés de manière congruente à la dissolution de cette matrice.

Dans les cas où les connaissances sur le modèle de relâchement différé ou sur la répartition de l'inventaire entre la phase labile (dans la matrice ou dans le volume libre des crayons) et la phase différée ne permettent pas de paramétrer un modèle de relâchement, l'Andra retient un relâchement labile pour l'ensemble des radionucléides [62].

S'agissant de l'évaluation de l'IRF, l'IRSN avait estimé au stade du DOS que le modèle retenu pour décrire l'IRF convenait pour les combustibles UOX, à condition de spécifier le taux de combustion maximal de validité du modèle. En effet, le modèle retenu par l'Andra n'intègre pas de terme de relâchement induit par l'auto-irradiation α compte tenu de la contribution négligeable de la diffusion athermique⁶⁸ des produits de fission et de l'absence d'incidence de l'accumulation d'hélium sur la microstructure des combustibles UOX (absence de microfissurations), hypothèses caduques au-delà d'un certain taux de combustion. Au stade du DDAC, l'Andra a précisé que ce modèle était valide pour des taux de combustion inférieurs à 60 GWj/t, ce dont l'IRSN convient compte tenu des caractéristiques microstructurales des combustibles UOX et des mécanismes de diffusion des produits de fission dans ce domaine. Aussi, compte tenu des taux moyens de combustion des combustibles UOX (52 GWj/t pour la famille présentant le taux de combustion le plus important), **l'IRSN estime pertinent le modèle retenu pour évaluer l'IRF de ces combustibles dans le cadre des études d'adaptabilité.** S'agissant de l'évaluation de l'IRF des combustibles MOX, l'IRSN relève que le modèle retenu par l'Andra intègre, de manière conservatrice, une composante liée aux amas de plutonium, ce qui est satisfaisant compte tenu des incertitudes liées à leur stabilité mécanique, point d'attention des précédentes expertises de l'IRSN [19][30]. **Aussi, l'IRSN estime ce modèle adapté pour une première évaluation de l'IRF des combustibles MOX au stade du DDAC.**

S'agissant de la fraction différée, l'Andra présente deux modèles de dissolution : le modèle radiolytique et le modèle électrochimique. En situation de référence du SEN « adaptabilité », les deux modèles sont retenus en parallèle. En situation enveloppe et pour l'étude d'impact, seul le modèle radiolytique est retenu par l'Andra, ce

⁶⁸ Diffusion accélérée par l'auto-irradiation.

qui n'appelle pas de remarque de l'IRSN compte tenu des interrogations sur le domaine d'applicabilité du modèle électrochimique (difficulté d'intégration des conditions d'environnement du stockage notamment). Le modèle radiolytique repose sur la génération par radiolyse de l'eau d'espèces oxydantes directement proportionnelle à l'activité α du combustible, qui constituent le facteur contrôlant la dissolution de la matrice. Celle-ci dépend alors uniquement de l'oxydation de U(IV) en U(VI). L'Andra indique que, dans une approche majorante, le modèle ne prend notamment pas en compte l'effet inhibiteur de l'hydrogène produit par corrosion, qui contribue, en maintenant des conditions réductrices, à réduire les vitesses de dissolution de la matrice [215]. A cet égard, l'IRSN relève que les récents résultats acquis dans le cadre de l'étude de la lixiviation des MOX en conditions représentatives du stockage [216][217] et les modèles développés intégrant l'effet inhibiteur du dihydrogène [218][219][220][221] confortent le caractère conservatif du modèle radiolytique retenu par l'Andra. Selon les conditions de ces études, les vitesses de dissolution peuvent en effet être réduites d'environ trois ordres de grandeurs en prenant en compte cet effet inhibiteur. **Aussi, l'IRSN convient du caractère enveloppe du modèle radiolytique tel qu'actuellement retenu par l'Andra et de son applicabilité dans le cadre des études d'adaptabilité.** L'IRSN encourage toutefois l'Andra à poursuivre les études qu'elle prévoit sur les effets inhibiteurs, afin de réduire les conservatismes du modèle actuel.

En conclusion, l'IRSN estime qu'au stade du DDAC, les modèles de relâchement des structures des assemblages et des matrices des combustibles (IRF et fraction différée) retenus par l'Andra sont cohérents avec l'état des connaissances actuelles et suffisants pour réaliser une première évaluation de l'impact du stockage des combustibles dans le cadre des études d'adaptabilité.

7.2. Évolution des matériaux cimentaires

Les principaux composants de Cigéo à base de matériaux cimentaires sont les conteneurs de stockage MA-VL, la matrice de blocage et/ou les colis primaires de certains déchets MA-VL, le matériau de remplissage à l'extrados des alvéoles HA (MREA), les soutènements et revêtements des LSF, des galeries d'accès et des alvéoles MA-VL ainsi que les massifs d'appui des noyaux de scellements de galeries d'accès et de LSF. Le rôle de ces composants est principalement mécanique (pour faciliter les opérations de manutention au cours de l'exploitation ou, pour les massifs d'appui des scellements, pour les maintenir et ainsi favoriser leur gonflement) et certains d'entre eux participent également au confinement des radionucléides (matrice de blocage et enveloppe du colis primaire notamment). L'altération des performances mécaniques des matériaux cimentaires dépend principalement des perturbations chimiques auxquelles ils sont exposés durant les différentes phases du stockage. L'examen par l'IRSN du vieillissement de ces matériaux, ci-après, porte donc sur leur évolution chimique.

L'Andra prévoit, au stade du DDAC, d'utiliser des bétons de type Portland CEM V⁶⁹ pour la plupart des conteneurs de stockage MA-VL et des bétons de type Portland CEM I, caractérisés notamment par une résistance mécanique à la compression spécifiée à 60 MPa, pour les soutènements et revêtements des galeries et des alvéoles MA-VL. Ce point constitue une évolution notable depuis le DOS, puisque l'Andra prévoyait alors de réaliser les soutènements d'alvéoles de déchets vitrifiés MA-VL en béton dits « bas pH » (pH inférieur à 11) et prévoit désormais de stocker ces colis en intercalaires dans les alvéoles HA. **L'IRSN prend note de cette évolution, qui est cohérente avec les remarques formulées par l'IRSN à l'issue de l'expertise du DOS de Cigéo.** S'agissant des massifs d'appui des scellements de galeries et de LSF, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que l'utilisation de bétons classiques était envisagée et que les bétons bas pH restaient étudiés au titre d'alternative possible.

L'évolution chimique des bétons de type Portland, retenus comme option de référence pour la construction de l'ensemble des ouvrages de Cigéo a fait l'objet de plusieurs décennies de recherche par l'Andra dans les conditions représentatives de celles attendues dans le stockage en phase d'exploitation et après sa fermeture. Les mécanismes principaux identifiés par l'Andra sont la carbonatation atmosphérique et, sous eau, l'hydrolyse ainsi que l'attaque sulfatique, en cohérence avec l'état de l'art dans des environnements similaires, incluant les études menées par l'IRSN dans son laboratoire souterrain à Tournemire. A cet égard, **l'IRSN souligne la qualité**

⁶⁹ Ciment Portland avec ajout de cendres volantes et/ou de laitier de haut fourneau.

de la recherche menée par l'Andra, qui combine expérimentations et modélisations. Sur cette base, l'Andra indique que les endommagements mécaniques liés à ces perturbations chimiques concomitantes pendant la phase d'exploitation, période durant laquelle une fonction de sûreté est attribuée à ces ouvrages en matériaux cimentaires, sont bien connues, **ce dont l'IRSN convient**.

S'agissant de l'évolution des bétons bas pH, qui restent étudiés comme alternative aux bétons de type Portland pour les massifs d'appui des scellements, les deux formulations étudiées à ce jour par l'Andra [223] sont des mélanges ternaires à base de ciment CEM I et de fumée de silice, complétés respectivement de cendres volantes ou de laitiers de hauts fourneaux. L'IRSN convenait au stade du DOS [30] que les bétons bas pH atténuent de façon notable la perturbation alcaline à long terme, ce qui limite l'endommagement de la roche. De plus, ils présentent l'avantage de limiter la température de prise (faible quantité de clinker) et par conséquent le risque d'endommagement mécanique à moyen-terme du massif d'appui en béton et de la roche environnante. L'IRSN s'interrogeait sur l'état de dégradation des zones d'interface entre le béton et la roche encaissante (COX et Oxfordien calcaire) et sur les conséquences de cette dégradation sur le comportement mécanique des massifs d'appui des LSF. Aussi, à l'issue de l'examen du DOS, l'IRSN rappelait que l'absence d'impact de l'évolution physico-chimique du béton bas pH dans le COX et dans l'Oxfordien calcaire sur les performances mécaniques des scellements n'était pas démontrée.

A cet égard, l'Andra indique dans le DDAC qu'il n'est pas attendu de comportement spécifique des bétons bas pH concernant leur réactivité chimique et l'évolution de leurs propriétés mécaniques, par rapport aux bétons classiques, puisque *« leurs compositions sont qualitativement les mêmes que celles des bétons à base de CEM V par exemple »*. A cet égard, l'IRSN rappelle que l'absence de portlandite dans les bétons bas pH, contrairement aux CEM I ou CEM V, a un effet important sur le pH et la concentration en calcium dans l'eau porale. Par ailleurs, l'IRSN observe que la différence chimique marquée entre le CEM V et le CEM I d'une part, et les formulations bas pH d'autre part, aboutit à des effets de la carbonatation beaucoup plus marqués pour les bétons de type bas pH que pour les bétons CEM I ou CEM V, notamment en milieu insaturé [224][225], ainsi qu'en milieu saturé représentatif du COX [226][227] ou de l'Oxfordien calcaire [228]. Aussi, au regard de leur différence de composition chimique et de réactivité dans des environnements représentatifs du stockage, **l'IRSN estime que l'analogie de l'évolution des propriétés d'un béton bas pH et d'un béton CEM V n'est pas justifiée**.

Concernant la modélisation de l'évolution à long terme des matériaux cimentaires bas pH en conditions de stockage, l'IRSN souligne que la littérature sur ces matériaux s'est enrichie depuis le DOS, notamment concernant les bases de données thermodynamiques des phases magnésiennes (silicate de magnésium hydraté ou M-S-H) susceptibles de se former en présence de magnésium [229][230], ce qui pourrait permettre à l'Andra d'améliorer sa modélisation du vieillissement des bétons bas pH en conditions de stockage. De surcroît, des résultats récents [231] montrent que les essais de lixiviation en eau pure pour des matériaux de ce type sont moins pénalisants que des attaques couplées avec du magnésium. En effet, l'ajout de magnésium dans le système accélère la décalcification des C-S-H (principal hydrate des bétons bas pH) et donc la dégradation du béton, car le M-S-H est plus stable que le C-S-H en eau porale argileuse. Par conséquent, l'IRSN estime que l'Andra pourrait prendre en compte l'effet du magnésium dans ses modélisations du vieillissement des bétons bas pH en conditions de stockage [231]. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé qu'une démarche d'intégration des M-S-H dans les modèles d'altération a été initiée. Cette démarche est fondée, sur une revue exhaustive des informations disponibles dans la littérature (nature et composition chimique des M-S-H, données thermodynamiques, observations expérimentales). **L'IRSN estime que cette démarche devrait permettre d'asseoir l'évaluation de l'évolution physico-chimique des bétons bas pH**.

En conclusion, dans le cas où l'Andra recourrait finalement aux bétons bas pH pour certains composants de Cigéo, tels que des massifs d'appui de noyaux de scellements, il lui appartiendrait de développer un programme scientifique, qui combine expérimentations et modélisations, dédié au vieillissement chemo-mécanique des composants en bétons bas pH de Cigéo, afin de s'assurer que la formulation retenue permet bien d'atteindre les performances visées.



7.3. Évolution des aciers

Après un bref descriptif des différents types d'aciers présents dans Cigéo, le présent chapitre présente l'examen par l'IRSN des connaissances retenues par l'Andra au stade du DDAC sur l'évolution des aciers des alvéoles HA. L'IRSN résume les exigences de sûreté, les choix technologiques de l'Andra pour les atteindre et les recherches qu'elle a conduites depuis le DOS, puis analyse ces résultats à la lumière de ses propres études concernant successivement les impacts du MREA, de l'activité bactérienne et des rayonnements gamma sur les phénomènes de corrosion, pour conclure sur l'adéquation entre l'état des connaissances et les objectifs visés. A noter que le dimensionnement de l'alvéole HA et les modalités de surveillance de cet alvéole au cours de la phase d'exploitation sont examinés dans le cadre des GP2 et GP3.

Les principaux composants métalliques du stockage sont les colis primaires de déchets HA, les conteneurs de stockage HA ainsi que les infrastructures métalliques du stockage participant au soutènement des ouvrages (chemisages des alvéoles HA, armatures des bétons armés, boulons et cintres). Les colis primaires HA en acier inoxydable constituent une barrière de confinement des radionucléides pendant la phase d'exploitation. Les conteneurs de stockage HA, en acier non allié, contribuent notamment à retarder l'arrivée de l'eau au contact des déchets vitrifiés et donc le relâchement des radionucléides. L'exigence sur leur durée d'étanchéité, de 350 à 500 ans selon le type de colis primaire HA, vise à couvrir les incertitudes liées à l'altération de la matrice vitreuse et au comportement des radionucléides lorsque la température du verre est supérieure à 70°C [48][51]. Enfin, les infrastructures métalliques en acier non allié ont une fonction essentiellement mécanique pour la période d'exploitation du stockage. En particulier, le chemisage, comme les conteneurs de stockage, doivent permettre les opérations de mise en place des colis dans les alvéoles HA et de retrait pendant une centaine d'années.

Au sein des alvéoles de stockage HA, les matériaux métalliques seront exposés à un environnement qui évoluera dans le temps : l'intrados du chemisage et le conteneur de stockage seront maintenus dans une atmosphère humide, à une température ne dépassant pas 45 °C pour les déchets HA0 et 90°C pour les déchets HA1/HA2, avec une teneur en oxygène ne dépassant pas 1% pendant la période d'exploitation, jusqu'à un milieu anoxique, saturé en eau et à la température géothermale du COX après fermeture du stockage [232]. Pour l'extrados du chemisage, la mise en place du MREA ainsi que de dispositifs de fermeture en tête d'alvéole visent à limiter l'apport d'oxygène. Outre ces transitoires chimiques, hydriques et thermiques, ces matériaux seront exposés à des rayonnements gamma (un critère de dimensionnement d'un débit de dose d'au maximum 10 Gy/h à l'extrados des conteneurs de stockage HA retenu par l'Andra pour déterminer l'épaisseur de ces conteneurs) ainsi qu'à une éventuelle activité bactérienne. Un enjeu fort, au vu de ces conditions d'environnement variées, est donc de s'assurer du caractère prédictible des phénomènes de corrosion, par la prédominance de la corrosion généralisée sur les phénomènes de corrosion localisée, ainsi que du caractère enveloppe de la vitesse de corrosion généralisée retenue pour vérifier que le dimensionnement des conteneurs de stockage HA et des chemisages permet de garantir l'atteinte de leurs fonctions et des performances associées.

Comme au stade du DOS, l'Andra retient deux choix de conception importants visant à limiter les phénomènes de corrosion localisée. D'une part, les nuances pétrolières d'acier retenues pour le chemisage (acier API 5L X65) et pour le conteneur de stockage (acier P285NH) visent à garantir une faible sensibilité à la corrosion sous contrainte et à la fragilisation par l'hydrogène [232], de même que le détensionnement des soudures du conteneur. D'autre part, la mise en place d'un MREA dans l'espace annulaire entre le chemisage et la roche a pour fonction de limiter les cinétiques de corrosion en neutralisant l'acidité en paroi d'alvéole due à l'oxydation des pyrites contenues naturellement dans la roche, en favorisant la formation de produits de corrosion passivants et en contribuant à limiter l'accessibilité à l'alvéole de l'oxygène provenant de la galerie d'accès ventilée [49]. Les chemisages sont équipés de centreurs pour permettre une injection du MREA sur toute leur circonférence et ainsi éviter leur contact direct avec la roche.

L'Andra considère que la précipitation de produits de corrosion passivants en surface va conduire à une diminution des vitesses de corrosion des aciers bas carbone dans le temps. Pour le dimensionnement du

chemisage et du conteneur de stockage HA, l'Andra retient ainsi en référence un processus de corrosion généralisée et une vitesse de corrosion constante de 10 µm/an.

Au stade du DOS, l'IRSN convenait que les nuances d'acier retenues par l'Andra, pour le conteneur de stockage HA et le chemisage, favorisaient l'occurrence prédominante de phénomènes de corrosion généralisée. En revanche, des incertitudes demeuraient sur l'impact des bactéries et de l'irradiation sur ces processus et sur les vitesses de corrosion associées. De plus, l'IRSN estimait que les dispositions techniques retenues lors de la fabrication des composants en acier des alvéoles HA en vue de limiter les phénomènes de corrosion localisée devaient être précisées. Enfin, suite au choix de retenir le MREA, l'Andra prévoyait un programme d'études complémentaires, couvrant un large domaine de conditions d'environnement, dans l'objectif notamment de mieux appréhender l'impact de sa mise œuvre.

Depuis le DOS, l'Andra a engagé un programme de recherche sur la corrosion des nuances d'acier retenues pour le chemisage et le conteneur de stockage, dans des conditions associées à un domaine de formulations du MREA couvrant une large gamme de pH, via des expérimentations en laboratoire. Dans le DDAC, l'Andra présente ainsi essentiellement les résultats d'essais de corrosion réalisés avec une première formulation de MREA ayant un pH modérément alcalin (III/C – FS50B).

Ce programme de recherche a notamment porté sur les conditions prévalant au contact du MREA durant le transitoire oxygène puis en milieu désaéré, l'amorçage et la propagation de fissures sous sollicitation mécanique, l'impact de l'activité bactérienne, l'impact des rayonnements gamma, et l'influence d'hétérogénéités (interfaces imparfaites entre l'acier et le MREA dues à la présence de débris de roche et/ou de zones de vide). Dans le DDAC, l'Andra retient des résultats de ce programme et de l'état de l'art les éléments suivants :

- le MREA permet de limiter les effets du transitoire acide et favorise une passivation de l'acier ;
- en présence d'oxygène et d'un pH d'environ 11, le phénomène de corrosion dominant est la corrosion généralisée et les phénomènes de corrosion localisée sont négligeables ;
- la vitesse de corrosion généralisée est faible (inférieure à 10 µm/an et jusqu'à à 0,1 µm/an) et décroissante dans le temps ;
- dans l'intervalle de pH de 9 à 11, certains milieux permettent à l'acier de prendre un potentiel suffisamment élevé pour atteindre un potentiel de piqûration (ou de dépassivation), pouvant conduire à une corrosion localisée ou hétérogène. La corrosion localisée est favorisée par la présence d'oxygène ;
- l'irradiation n'a pas d'influence, dans la gamme de débits de dose étudiée, sur les processus ou vitesses de corrosion ;
- l'activité bactérienne n'a pas d'impact significatif sur les vitesses de corrosion dans les conditions expérimentales retenues ;
- une incertitude résiduelle demeure sur la concentration et le flux d'oxygène dans l'alvéole, qui influencent le potentiel rédox du milieu et le potentiel libre de corrosion de l'acier, qui déterminent les conditions d'une passivité stable. Pour se prémunir d'une dégradation accélérée en présence d'oxygène, des gammes de pH supérieures à 11 seraient nécessaires.

L'IRSN estime que le programme présenté par l'Andra couvre bien la variété des paramètres environnementaux, représentatifs des conditions pouvant prévaloir en stockage et constitue **des travaux de qualité** qui complètent le référentiel de connaissances préexistant. De l'analyse des recherches conduites par l'Andra depuis le DOS, l'IRSN relève toutefois les éléments suivants.

S'agissant de l'impact du MREA majoritairement testé (III/C – FS50B) sur les phénomènes de corrosion, des études entreprises par l'Andra (e.g., [232]), menées sur près d'un an, montrent qu'au contact d'un environnement légèrement alcalin ($10 < \text{pH} < 11$), à une température de 90°C et en conditions aérées, représentatif de l'interface acier/MREA durant le transitoire oxygène, l'acier API 5L X65 est fortement impacté par des processus

de corrosion donnant lieu à la précipitation importante de produits de corrosion dits « flocculants⁷⁰ ». Ces processus conduisent à des vitesses de corrosion élevées qui augmentent avec le temps pour atteindre près de 200 µm/an avec localement des phénomènes de corrosion par piqûration. Dans ces mêmes conditions, l'acier P285NH apparaît également impacté par des phénomènes de corrosion importants conduisant à des vitesses de corrosion élevées (pouvant atteindre 100 µm/an). Dans un milieu désaéré correspondant à une eau argileuse ayant percolé à travers un volume de MREA (pH de 10), représentatif des conditions rencontrées à l'extrados du chemisage à la suite du transitoire oxydant, les vitesses de corrosion généralisée mesurées pour l'acier API 5L X65 sont moins importantes, mais restent pour une série de tests supérieures à 10 µm/an (moyenne de l'ordre de 40 µm/an).

Par ailleurs, les études menées par l'IRSN en présence d'un MREA de composition proche de celui testé par l'Andra (III/C – FS50B) et en conditions désaérées, en laboratoire (boîte à gants anoxique) et en conditions *in situ* (comprenant un transitoire oxydant) jusqu'à environ 30 mois, montrent que des phénomènes de corrosion localisée sont systématiquement observés [234][235]. Ces études montrent également que les vitesses de corrosion les plus élevées sont mesurées pour les échantillons placés au contact direct du MREA. L'occurrence de tels processus semble fortement favorisée par la présence des sulfures présents dans la formulation de référence du MREA (base CEM III + bentonite) retenue par l'Andra [236]. Ces expériences ont permis à l'IRSN d'observer une coalescence de ces piqûres, dont la profondeur semble se stabiliser autour de 120 µm après un an, et de conclure que les valeurs de pH atteintes (au maximum pH 9,7 à 80°C) pourraient ne pas permettre une passivation efficace de la surface métallique. Par ailleurs, les études conduites par l'IRSN (références précitées) indiquent une différence d'un ordre de grandeur entre les valeurs moyennes de vitesses de corrosion généralisée déterminées en laboratoire (10 µm/an) et celles mesurées pour des expériences réalisées *in situ* et à échelle plus représentative (100 µm/an). L'IRSN estime que ces différences pourraient être dues aux plus grandes quantités de MREA mises en jeu et à des conditions expérimentales moins bien maîtrisées (quantité de sulfures et volume d'oxygène disponible plus importants). De plus, l'IRSN considère que durant le transitoire oxydant, qui s'étend sur une durée plus importante pour les tests *in situ*, l'accumulation de produits de corrosion flocculants et peu denses à l'interface acier/MREA est susceptible de conduire à des processus de corrosion sous dépôt pouvant perdurer dans le temps (migration des éléments agressifs à travers cette couche très poreuse). Ainsi, ces études montrent que la nature des processus de corrosion observés est fortement dépendante des termes sources sulfure, présent dans le MREA, et oxygène, piégé dans la porosité du MREA (et potentiellement plus important *in situ* car renouvelé du fait de la ventilation des alvéoles en phase d'exploitation).

Aussi, l'IRSN considère que la première formulation de MREA (III/C – FS50B), testée par l'Andra au stade du DDAC, ne permet pas de s'affranchir de l'occurrence de processus de corrosion localisée. A ce stade des connaissances, l'IRSN estime donc que la vitesse de corrosion de 10 µm/an retenue par l'Andra, associée à un processus de corrosion généralisée uniquement, n'est pas conservative, même après le transitoire oxydant. En outre, des essais *in situ* réalisés à une échelle représentative des conditions de stockage et sur des temps longs (plusieurs années) sont indispensables pour conforter les résultats des essais réalisés en laboratoire.

Par ailleurs, l'Andra a mis en place un programme d'étude visant à caractériser les mécanismes d'amorçage et de propagation de fissure sous sollicitation mécanique pour des éprouvettes correspondant aux deux nuances d'acier retenues en référence, et ce pour différentes conditions expérimentales (conditions oxydantes et désaérées, température de 90°C et pH variant de 8 à 11) [233]. L'IRSN relève que les éprouvettes présentaient une corrosion localisée très importante et qu'un nombre significatif d'entre elles ont rompu en raison de leur endommagement induit par les processus de corrosion. Sur une des éprouvettes n'ayant pas rompu, l'apparition de micro-fissures a pu être observée en milieu désaéré. Sur la base de ces observations, l'IRSN estime que les conditions d'environnement rencontrées au sein de l'alvéole de stockage au cours de la phase d'exploitation avec le MREA III/C – FS50B pourraient provoquer des phénomènes de corrosion localisée qui, sous contrainte mécanique, pourraient entraîner des processus de fissuration. De plus, du fait de la corrosion localisée très importante

⁷⁰ Agglomération en flocons, similaires à des colloïdes.

rencontrée sur les éprouvettes, la corrosion sous contrainte⁷¹ des aciers bas carbone, bien que non observée actuellement, ne peut pas selon l'IRSN être écartée à ce stade. **Des essais supplémentaires conclusifs, permettant d'évaluer les endommagements liés uniquement à la corrosion sous contrainte (i.e., caractérisation d'échantillons métalliques peu ou pas impactés par des processus de corrosion localisée) sont donc nécessaires pour statuer définitivement sur l'absence d'amorce de corrosion sous contrainte des aciers utilisés et en particulier du chemisage au contact du MREA.**

S'agissant de l'impact de l'activité bactérienne, l'Andra s'était engagée (E19-2017) à présenter dans le DDAC les travaux de son programme de R&D sur la corrosion des aciers, relatifs aux effets d'une activité bactérienne. L'Andra indique [237] que les conditions prévalant au contact des aciers, y compris en présence du MREA III/C – FS50B, ne sont pas en mesure d'empêcher une activité bactérienne, et précise que les processus de corrosion en présence de micro-organismes pourraient conduire à la formation de biofilms et/ou de sulfures de fer d'origine biotique à la surface des aciers, qui pourraient conduire à des phénomènes de couplages galvaniques et à l'apparition de processus de corrosion localisée. Dans ce contexte, l'Andra rappelle que les valeurs de vitesse de corrosion retenues au stade du DDAC sont issues d'expérimentations effectuées notamment *in situ* sans précaution particulière vis-à-vis d'une potentielle activité bactérienne (i.e., pas de stérilisation) et que ces vitesses intègrent donc la contribution des micro-organismes, **ce dont l'IRSN convient**. L'IRSN constate néanmoins que, pour les études réalisées par l'Andra pour caractériser l'impact de l'activité bactérienne sur les processus de corrosion des aciers de référence en présence ou non de MREA [238], il n'a pas été réalisé de caractérisation post-mortem des produits de corrosion formés sur les échantillons testés en présence de micro-organismes. Or, une caractérisation des produits de corrosion aurait permis de mieux comprendre les processus responsables des dégradations observées dans ces environnements contenant des bactéries, et de pouvoir ainsi en évaluer la contribution. **A cet égard, l'IRSN souligne l'importance de réaliser une caractérisation post-mortem des produits de corrosion formés à la suite d'expériences de corrosion en présence de micro-organismes.**

Concernant l'impact des rayonnements gamma sur les processus de corrosion, l'Andra précise que des travaux visant à étudier leur influence ont été réalisés sur les deux nuances d'acier retenues [81]. Les échantillons métalliques ont ainsi été immergés dans une solution synthétique qui représente l'interaction entre l'eau porale du MREA et l'eau porale argileuse du COX, puis exposés à des débits de dose compris entre 10 Gy/h et 20 Gy/h sur des périodes de 3 à 18 mois. L'Andra souligne, à l'issue de ces études, qu'aucune différence notable n'est observée en ce qui concerne les morphologies ou les vitesses moyennes de corrosion entre les échantillons irradiés ou non, et en déduit que les effets de l'irradiation sont faibles. Or, l'IRSN constate que les endommagements les plus importants observés par l'Andra, de l'ordre de 50 µm (profondeur maximale), ont été relevés sous irradiation (15 µm sans irradiation). De plus, l'IRSN estime, sur la base de ses propres recherches, que l'évolution des conditions physico-chimiques liée à la radiolyse de l'eau (formation d'espèces oxydantes de type H₂O₂) est susceptible d'entraîner des modifications de propriétés de la couche de produits de corrosion formée (nature des produits de corrosion, augmentation de la porosité) qui pourraient conduire à un maintien dans le temps des vitesses de corrosion initialement observées [239]. **Aussi, l'IRSN estime que des incertitudes subsistent sur le caractère non impactant des rayonnements gamma sur les modes et les vitesses de corrosion.**

Enfin, malgré la mise en place de centreurs sur le chemisage (cf. ci-dessus) et les opérations de nettoyage de l'alvéole prévues avant l'injection du MREA afin de limiter la quantité de débris, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle n'excluait par la présence de contact entre l'acier du chemisage et des fragments de roche se détachant progressivement de la paroi argileuse et migrant par gravité au sein du coulis cimentaire. Or, la nature des produits de corrosion qui se forment localement à ces doubles interfaces (argilite/acier/MREA) diffère de celle des produits de corrosion observés à l'interface simple entre acier et MREA, ce qui pourrait favoriser la création de cellules de corrosion (phénomène de corrosion galvanique) à l'origine de processus de corrosion

⁷¹ La corrosion sous contrainte d'un métal ou d'un alliage résulte de l'action conjuguée de trois facteurs: (i) une contrainte statique comprenant au moins une composante de tension, (ii) un milieu environnant agressif et (iii) un matériau sensible aux phénomènes de corrosion sous contrainte, au moins dans certaines conditions

localisée [240]. Ces observations sont confirmées par les expérimentations réalisées par l'IRSN, qui mettent en évidence que les processus de corrosion localisée sont exacerbés lorsque la surface métallique entre en contact avec la roche argileuse en présence de MREA [234]. **L'IRSN considère ainsi que l'Andra devrait prendre en compte l'éventualité de contacts locaux entre débris de roche et chemisage en présence de MREA dans son évaluation de la valeur enveloppe de la vitesse de corrosion des chemisages.**

Sur la base de l'ensemble des éléments qui précèdent, l'IRSN considère que les dispositions technologiques présentées au stade du DDAC par l'Andra pour les alvéoles de stockage HA (géométrie et formulation du MREA) ne permettent pas d'exclure la possibilité de phénomènes de corrosion localisée (piqûration et/ou corrosion sous dépôt, corrosion sous contrainte) répétés sur plusieurs zones de la surface du chemisage, de nature à remettre en cause le caractère enveloppe de la vitesse de corrosion généralisée retenue de 10 µm/an.

Au cours de l'instruction, l'Andra a convenu que les résultats obtenus avec le MREA III/C – FS50B ne permettent pas de garantir les fonctions du chemisage et du conteneur, en particulier en milieu oxydant, et indiqué qu'elle avait donc abandonné cette formulation pour se focaliser sur des formulations à pH plus élevé rejoignant ainsi un domaine alcalin plus classique et connu pour les aciers. Ainsi, l'Andra a indiqué travailler à l'élaboration d'autres formulations de MREA permettant de répondre aux objectifs de limitation de la corrosion de l'acier du chemisage (pH plus alcalin, peu ou pas de sulfures) et a présenté les grandes lignes de programme de recherche avec ces nouvelles formulations. Ce programme comprend notamment des essais en laboratoire en conditions variées (notamment présence de bactéries et d'hétérogénéités de contact aux interfaces acier/roche/MREA) et un démonstrateur au LSMHM, mettant en œuvre des méthodes de mesure de vitesse de corrosion directes (mesures gravimétriques sur coupons positionnés sur l'extrados du chemisage) et indirectes (mesures électrochimiques). L'Andra a précisé que les résultats dont elle disposait à ce jour, sur la base de premiers essais avec une formulation à pH plus élevé, montrent des vitesses de corrosion faibles (globalement inférieures à 1 µm/an après quelques mois) ainsi qu'une prédominance de la corrosion généralisée en cohérence avec l'état des connaissances de la corrosion des aciers en environnement cimentaire à pH élevé.

L'IRSN prend note de l'existence de résultats préliminaires encourageants et considère que l'Andra doit poursuivre ce programme de recherche, le préciser à l'horizon du GP3 (description des objectifs, des moyens expérimentaux mis en œuvre, des conditions d'environnement, des techniques d'analyse, des échéances, etc.), et en présenter le bilan avant le creusement du quartier pilote HA. **A cet égard et compte tenu des enjeux forts associés à la tenue des composants métalliques des alvéoles HA, l'IRSN estime que l'Andra devra mettre en œuvre, dans le cadre de ce programme pendant la phase pilote, un alvéole HA témoin visant à confirmer, sur la base de caractérisations post-mortem du chemisage, les processus de corrosion en jeu et les vitesses associées.**

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra préciser, en vue de l'examen du GP3, son programme de recherche en phase pilote de Cigéo sur la corrosion des composants métalliques des alvéoles HA avec les nouvelles formulations de matériaux de remplissage. Ce programme devra permettre de disposer de résultats probants justifiant la pertinence du dimensionnement des composants de l'alvéole HA avant le creusement du premier alvéole du quartier pilote destiné à recevoir des colis HA0.

Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E12](#) de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant. **Toutefois, l'IRSN estime qu'au stade du DDAC, les données nécessaires pour justifier le dimensionnement des composants métalliques de l'alvéole HA, qui est examiné dans le cadre des GP2 et GP3, restent marquées par des incertitudes significatives, ce qui constitue un point d'attention pour statuer sur la pertinence du concept d'alvéole HA actuellement retenu.**

8. EVOLUTION DES SCELLEMENTS

Dans ce chapitre, le rôle des différents scellements envisagés par l'Andra dans le système de fermeture de Cigéo est examiné au chapitre 8.1, avec une attention particulière pour le scellement de LSF compte tenu du rôle prépondérant que lui attribue l'Andra et du transitoire hydraulique-gaz particulier auquel il est soumis. Le chapitre 8.2 examine ensuite les performances attendues de ces différents scellements et la possibilité de les atteindre avec les concepts retenus dont le composant principal est un noyau argileux constitué d'un mélange bentonite/sable. Enfin, le chapitre 8.3 examine l'état d'avancement de la définition des démonstrateurs de ces scellements, dont la mise en place dès le début de la construction de Cigéo est un attendu important de la phase pilote.

8.1. Rôle et particularités des différents scellements

L'Andra [57] indique que les scellements sont des ouvrages de faible perméabilité hydraulique disposés localement dans l'installation souterraine (cf. Figure 15 du chapitre 2.5.2.1). Outre leur fonction de soutien mécanique qu'ils partagent avec les remblais, ils ont pour fonction principale de « s'opposer à la circulation de l'eau » dans le stockage. Cette fonction se décline de la façon suivante :

- pendant le transitoire de resaturation : limiter les flux d'eau provenant des formations sus-jacentes ;
- en régime permanent après resaturation : limiter les flux d'eau circulant via les LSF entre le stockage et les formations aquifères sus-jacentes.

Pour cela, la principale exigence associée aux scellements [57] est d'atteindre « une résistance hydraulique suffisante pour préserver la dominance de la voie de transfert des radionucléides solubles par la couche du Callovo-Oxfordien par rapport à la voie de transfert par les ouvrages ».

Les schémas de principe des différents scellements envisagés par l'Andra sont présentés sur les Figure 17 et Figure 19 du chapitre 2.5 du présent rapport. L'Andra [57] présente ainsi différents concepts de scellements avec parfois quelques variantes, qu'elle regroupe en deux types d'ouvrages :

- les scellements de LSF (puits et descenderies), situés au toit de la formation hôte ;
- les scellements de fond (ou « de galerie »), situés dans les galeries de l'installation souterraine, dans l'unité argileuse (UA) du COX.

Comme indiqué au chapitre 2.5, ces deux types de scellements ont pour composant principal un noyau à base d'argile gonflante. L'Andra [58] leur attribue des rôles et importances différents dans le système de fermeture de Cigéo : les scellements de LSF apportent la plus grande efficacité hydraulique au système de stockage en participant à la limitation des flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations encaissantes. Les scellements de fond augmentent la résistance hydraulique des galeries et contribuent à l'organisation des gradients hydrauliques, des flux et des vitesses d'écoulement dans l'installation ; en cas de défaillance des scellements de LSF, ils limitent les flux d'eau le long des galeries. Ainsi, l'Andra précise [58] qu'il existe toujours au moins deux scellements (un de fond et un de LSF) entre un quartier de stockage et l'aquifère supérieur. La performance du système de fermeture de Cigéo est évaluée dans le cadre du GP3 relatif à l'évaluation de la sûreté après fermeture.

L'Andra [57] justifie le rôle principal joué par les scellements de LSF par :

- leur localisation sur le trajet de tous les écoulements susceptibles de sortir au toit de la formation hôte par les ouvrages ;
- leur positionnement dans l'USC (voire dans l'UT) dont les propriétés mécaniques limitent l'apparition de zones de roche endommagée ;
- pour les puits, la verticalité de l'ouvrage qui facilite la mise en œuvre du scellement.

Concernant le second point, l'Andra [57] précise que dans l'USC (et dans une moindre mesure dans l'UT), la zone de roche endommagée limitée attendue autour des ouvrages (cf. chapitre 6.3) permet d'envisager une dépose totale du revêtement en béton et de mettre le noyau de scellement en contact direct de la paroi ; cette possibilité, conjuguée avec une roche peu endommagée en paroi, augmente significativement l'efficacité du scellement. Dans l'UA au contraire, la présence d'une importante zone endommagée en paroi conduit l'Andra à n'envisager la dépose du revêtement que partiellement et augmente notablement la perméabilité globale de l'ouvrage. Ainsi, pour une même performance visée du noyau de scellement, la performance globale attendue d'un scellement de LSF est environ 100 fois supérieure à celle d'un scellement de fond [57].

L'Andra indique également que la mise en place du noyau argileux des scellements de LSF en partie haute du COX permet de bénéficier d'une grande longueur de scellement pour s'affranchir des effets de bord de leur noyau. L'IRSN souligne à cet égard la faiblesse relative des scellements de puits de ventilation VVE et VFE qui ne peuvent être scellés que sur environ 23 m, presque uniquement dans l'USC, alors que les autres puits situés dans la zone travaux peuvent être scellés sur environ 36 m s'étendant dans l'USC et dans l'UT.

Une autre particularité des scellements de LSF concerne le transitoire hydraulique-gaz (cf. chapitre 6.2). Du fait de leur positionnement au toit de la formation hôte, les scellements de LSF sont alimentés en eau par les horizons poreux de l'Oxfordien calcaire et se resaturent beaucoup plus vite que les scellements de fond. L'Andra précise [191] que la durée de resaturation des scellements de fond est de l'ordre du millier d'années alors que [58] la partie haute des scellements de LSF (puits et descenderie) se resature complètement sur une épaisseur métrique en seulement quelques dizaines d'années. La Figure 33 montre qu'en dessous de cette épaisseur métrique, la resaturation d'un scellement de puits se poursuit sur une certaine hauteur par de l'eau de l'Oxfordien calcaire qui s'infiltré dans l'interface scellement/roche puis radialement en partie basse du noyau par de l'eau du COX, ce qui aboutit à la formation d'un profil de resaturation particulier qui pourrait avoir un impact sur le passage ultérieur des gaz.

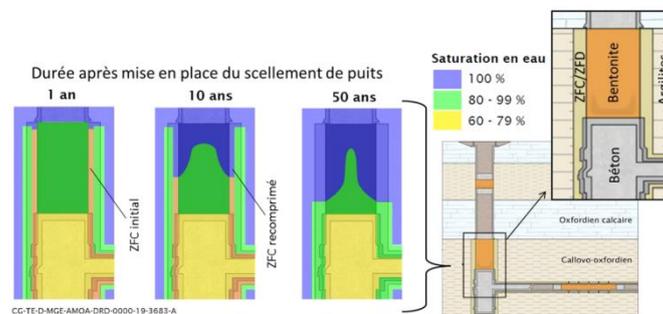


Figure 33. Resaturation rapide de la partie haute d'un noyau de scellement de puits par l'eau de l'Oxfordien sus-jacent

Lorsque la pression des gaz produits dans le stockage (cf. chapitre 6.2) dépasse la pression d'entrée de gaz du noyau, soit quelques dizaines de milliers d'années après la fermeture du stockage, un flux de gaz traverse le scellement. Selon l'Andra, ce flux n'entraîne pas de désaturation importante de l'argile gonflante du noyau, qui reste très proche de la saturation en eau (saturation supérieure à 95 %), et le scellement se resature complètement lorsque la production de gaz s'arrête, soit au-delà de la centaine de milliers d'années, lorsque tout le métal est corrodé. L'IRSN souligne que l'Oxfordien calcaire est susceptible d'appliquer une charge hydraulique de l'ordre de 3~4 MPa sur la partie supérieure du scellement avant que l'équilibre hydromécanique ne soit atteint, qui doit également être considérée dans la description du transitoire hydraulique-gaz subi par le scellement de LSF. L'IRSN mène à ce sujet une expérimentation (*VSeal - Vertical Sealing*) au Laboratoire souterrain de Tournemire dans une argilite du Toarcien comparable à celle de l'USC du COX ([241], [242], [243]). Les premiers résultats montrent que de petites hétérogénéités apparues lors de la mise en place du noyau (petite zone endommagée en paroi, vides technologiques et hétérogénéités près de l'interface bentonite/roche...) provoquent l'apparition de chemins d'écoulement préférentiels susceptibles d'influencer le développement des pressions de gonflement et de conduire à une dégradation des performances hydrauliques du scellement lorsque celui-ci sera sollicité par les gaz. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les processus de pressurisation

de la face supérieure d'un scellement de LSF par les eaux de l'Oxfordien calcaire, d'absence d'érosion due à cette pressurisation, d'impact des gaz ou d'éventuelles bulles d'air piégées dans le scellement ne sont pas présentés dans le DDAC et que des études complémentaires, avec des modélisations plus approfondies, ont été engagées dans le cadre du programme d'activités scientifiques et technologiques mis en œuvre après le dépôt du DDAC [135]. L'IRSN considère qu'en l'état actuel des connaissances, les perturbations induites par les méthodes de creusement aux parois des ouvrages destinés à recevoir des scellements de LSF, notamment les puits, doivent être limitées autant que possible.

En conclusion, concernant le rôle joué par les différents scellements dans le système de fermeture de Cigéo, l'IRSN relève (i) le rôle important joué par les scellements de LSF dans le système de fermeture de Cigéo du fait de leur position au toit de la formation, (ii) la performance hydraulique plus élevée qui en est attendue et (iii) les sollicitations particulières auxquelles sont soumis ces ouvrages par les eaux de l'Oxfordien et les gaz. A cet égard, l'IRSN estime que les hétérogénéités initiales résultant de leur mise en place, notamment au niveau de leur interface avec la roche, peuvent conduire à la création de chemins d'écoulement préférentiels susceptibles de dégrader leurs performances ultérieures. **Par conséquent, l'IRSN considère que dans l'état actuel des connaissances, l'Andra devrait prévoir des dispositions particulières en vue de minimiser ces hétérogénéités initiales, y compris au niveau de l'interface de la roche avec l'ouvrage.** Cette conclusion participe à la **Recommandation n°2** de l'IRSN présentée au chapitre 6.3.3 relatif aux techniques de creusement des puits dans le COX.

Par ailleurs, comme indiqué à l'issue de l'instruction du DOS de Cigéo [30], l'IRSN estime que **la performance globale du système de fermeture du stockage ne doit pas reposer sur un seul type de scellement mis en place dans un nombre limité d'ouvrages** que sont les LSF, d'autant plus qu'à ce stade, des éléments de démonstration relatifs aux scellements de ces LSF sont encore attendus après le dépôt du DDAC. Par conséquent, l'IRSN encourage l'Andra à **poursuivre la recherche de concepts de scellements de fond suffisamment performants pour assurer cette redondance**, y compris le cas échéant en envisageant la réalisation de coupures hydrauliques (ou saignées) pour interrompre la ZFC, disposition qui n'est actuellement retenue qu'en alternative du concept de scellement de fond retenu. A cet égard, l'IRSN rappelle d'une part que des interrogations relatives à l'auto-colmatage de la ZFC attendue autour des ouvrages de grand diamètre sont soulevées au chapitre 6.3.2 du présent rapport et d'autre part, que l'Andra s'est engagée (2014-E-1.3) à poursuivre ses investigations pour développer cette variante avec coupures hydrauliques jusqu'au stade du prototype dans le cadre de la phase industrielle pilote.

8.2. Performances des scellements et mélanges bentonite/sable

L'Andra [57] attribue les trois exigences de performance suivantes aux différents scellements :

- une résistivité hydraulique équivalente (ou perméabilité « en grand ») de 10^{-11} m/s pour les scellements de LSF et de 10^{-9} m/s pour les scellements de fond,
- une pression de gonflement de l'ordre de 1 MPa à 4 MPa,
- une pression d'entrée de gaz de l'ordre de 1 MPa à 2 MPa.

Pour atteindre la performance hydraulique visée, l'Andra compte sur un noyau argileux de perméabilité à l'eau inférieure à 10^{-11} m/s à saturation. Par ailleurs, l'Andra [57] a ajouté par rapport au DOS une nouvelle exigence relative à une « *pression d'entrée de gaz faible* » qui vise à limiter les pressions de gaz estimées dans le stockage après sa fermeture en rendant les différents scellements « *passants au gaz* » (cf. chapitre 6.2). **L'IRSN souligne que concilier la nouvelle exigence attribuée aux scellements d'être « passants au gaz » avec celle de scellements de faible perméabilité à l'eau n'est pas triviale et peut sembler contradictoire.**

L'IRSN observe que la valeur cible de 10^{-11} m/s pour les scellements de LSF est du même ordre de grandeur que celle retenue dans le « Dossier 2005 » et que celle de 10^{-9} m/s pour les scellements de fond correspond à une performance inférieure d'un ordre de grandeur par rapport au « Dossier 2005 », ce qui ne semble pas très ambitieux au regard des performances des scellements de puits de deux ordres de grandeur supérieures. L'IRSN

rappelle que l'examen du Dossier « Ouvrages de fermeture » en 2014 [24] avait montré qu'une performance de cet ordre de grandeur des scellements de fond ne permettait pas d'assurer une véritable redondance des scellements de LSF en cas de défaillance de ces derniers. L'impact de ces différents composants sur la performance globale de Cigéo est examiné plus spécifiquement dans le cadre du GP3 relatif à l'évaluation de la sûreté après fermeture.

L'Andra indique que pour satisfaire l'ensemble des exigences précitées, les noyaux de scellement seront composés d'un mélange d'argile gonflante (bentonite) et d'additifs (tels que du sable) dont les proportions seront ajustées pour obtenir les propriétés visées (densité, pression de gonflement, pression d'entrée de gaz). Selon l'Andra, la pression de gonflement et la perméabilité à l'eau visées par le noyau argileux peuvent être atteintes pour des densités sèches de bentonite comprises entre 1,2 g/cm³ et 1,4 g/cm³ et ainsi qu'illustré par la Figure 34 ci-après, une proportion de sable de l'ordre de 60 % (40 % de bentonite) permet d'atteindre les pressions d'entrée de gaz visées comprises entre 1 MPa et 2 MPa.

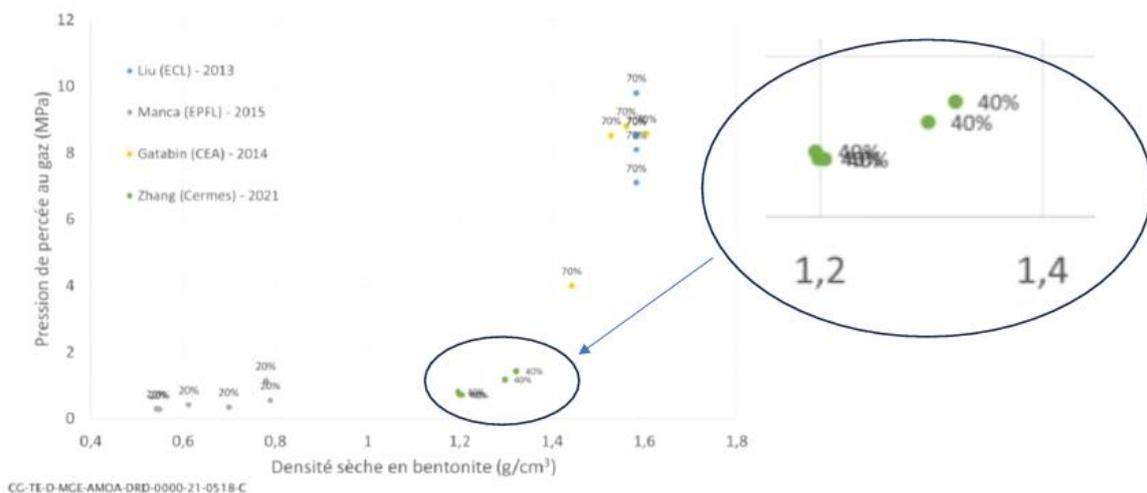


Figure 34. Pression de percée au gaz obtenue sur échantillons en fonction de la densité sèche en bentonite avec trois proportions de bentonite (20 %, 40 % et 70 %) [57].

L'IRSN indique que l'ajout de sable dans les mélanges argileux est un procédé parfois utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques du mélange et que son effet sur la pression d'entrée de gaz est effectivement connu mais que la pertinence de ce concept pour un ouvrage industriel de grandes dimensions tel que les scellements de LSF soumis à un transitoire hydraulique-gaz particulier tel que décrit ci-avant reste à vérifier. Concernant les essais sur échantillons présentés par l'Andra, l'IRSN relève que le taux de sable visé (60 %) dépasse à présent celui de la bentonite (40 %) et estime que cette évolution majeure par rapport au DOS, qui ajoute une hétérogénéité supplémentaire dans le noyau argileux, nécessite de refaire de nombreux essais de qualification pour déterminer la composition optimale du mélange, valider le mode de mise en place et définir les moyens de contrôle, notamment. L'IRSN attire également l'attention sur l'impact que pourraient avoir les panaches alcalins sur ces mélanges contenant un taux élevé de sable. En effet, les noyaux de scellement sont construits à proximité de quantités importantes de béton (portions de revêtement laissés en place, massifs d'appui) qui en se dégradant à long terme produiront des panaches alcalins, susceptibles de dissoudre la silice, composant majeur du sable. Bien que l'enjeu soit *a priori* moindre pour les scellements de LSF pour lesquels le revêtement en béton est totalement déposé, l'IRSN estime que cette préoccupation devra être prise en compte dans la définition des essais que l'Andra devra réaliser pour qualifier ces mélanges, notamment au regard de l'importance que l'IRSN accorde aux scellements de fond.

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les premiers essais sur échantillons ont été réalisés dans le cadre du programme NSC (essai à échelle 1 d'un Noyau de Scellement au LSMHM) au-delà des données d'essais déjà

disponibles à cette date, notamment à l'étranger, et que les programmes de caractérisation actuels visent à consolider et à étendre le domaine de formulation des matériaux pour les noyaux de scellement. Les tests de performances à l'eau et au gaz planifiés dans l'expérimentation NSC permettront d'apporter des éléments supplémentaires à une échelle représentative d'un ouvrage et dans les conditions de mise en place en ouvrage souterrain. Concernant la représentativité de ces essais par rapport au contexte chimique attendu dans un stockage, l'Andra a précisé que ceux-ci seront réalisés en utilisant une eau d'hydratation représentative de l'eau interstitielle du COX, en mettant en jeu une interface avec des matériaux cimentaires et en étudiant des mélanges bentonite/sable.

L'IRSN estime que la mise au point d'un mélange bentonite/sable permettant d'atteindre l'ensemble des exigences visées par l'Andra nécessite en effet un programme d'essais dédié sur échantillons pour définir ce mélange, puis la réalisation d'essais à différentes échelles pour en valider la mise en œuvre, le contrôle et la performance. **Compte tenu du retour d'expérience relatif aux essais de ce type, l'IRSN estime que la réalisation d'un tel programme s'entend sur une longue durée, particulièrement dans le cas des deux démonstrateurs à échelle 1 prévus dès la tranche 1 (T1) de Cigéo sans resaturation artificielle.** Cet élément de conclusion relatif aux essais est inclus dans l'[engagement 2024-E-15](#) de l'Andra présenté au chapitre 8.3 ci-après.

8.3. Démonstrateurs de scellements

L'Andra [57] indique que la demande d'autorisation de création de Cigéo vise aussi l'autorisation de mettre en place deux démonstrateurs de scellement, afin de tester en conditions réelles leur comportement dans le temps dès la tranche 1 en phase pilote. Ainsi, afin d'apporter au plus tôt les justifications requises sur la fermeture de Cigéo, l'Andra [45] prévoit de réaliser les démonstrateurs suivants (cf. Figure 15) :

- un démonstrateur de scellement de descenderie, dans une galerie parallèle à la descenderie de service et instrumenté par forage depuis une galerie d'auscultation, elle aussi parallèle à la descenderie. Le démonstrateur sera construit dans l'USC du COX et équipé afin de suivre son comportement hydromécanique avant la mise en service de la zone exploitation de l'installation souterraine Cigéo. L'hydratation naturelle par le COX sur la surface latérale de ce scellement, l'hydratation artificielle sur sa face supérieure (qui sera appliquée afin d'être représentatif de l'hydratation par les eaux de l'Oxfordien calcaire attendue en situation réelle), l'impact du déconfinement mécanique de la paroi induit par le creusement et du reconfinement de celle-ci par le gonflement du noyau de scellement lors de sa resaturation seront suivis ;
- un démonstrateur de scellement de galerie, actuellement prévu dans la zone de soutien logistique travaux, donc dans l'UA du COX, dans une galerie orientée selon la direction de la contrainte principale majeure afin d'être représentatif de la situation réelle. Il sera instrumenté afin de permettre l'auscultation du noyau de scellement, des massifs d'appui (dans le cas où il en serait pourvu), du COX environnant, et pourra comporter une coupure hydraulique (saignée).

L'Andra précise que ces démonstrateurs contribueront à préciser la définition et la constructibilité et à vérifier le « bon fonctionnement » de l'ouvrage sur la durée d'exploitation de Cigéo afin de donner des clés de connaissances à des échelles spatiales et temporelles représentatives à ceux qui auront à décider de la fermeture de Cigéo. Par ailleurs, l'Andra [45] indique que la fermeture du LSMHM, lorsqu'elle sera décidée, pourra être l'occasion d'un essai de fermeture (remblaiement et scellement d'un des deux puits d'accès) en vraie grandeur, représentatif de la fermeture d'une installation souterraine et réalisé suffisamment en amont de celle de Cigéo pour apporter des connaissances complémentaires à celles des deux démonstrateurs dans Cigéo aux générations futures.

L'IRSN rappelle (cf. chapitre 6.2 relatif au transitoire hydraulique-gaz) que si la durée de resaturation d'un scellement de galerie est de l'ordre du millier d'années, celle de la partie supérieure d'un scellement de LSF (puits ou descenderie) devrait être de « seulement » quelques dizaines d'années sous l'effet des eaux de l'Oxfordien calcaire. Cette durée, relativement courte, devrait donc permettre d'observer un début de performance

hydraulique sur le démonstrateur de scellement de descenderie pendant la durée de la phase pilote, pour peu qu'il soit mis en place suffisamment tôt.

Au cours de l'instruction, l'Andra a confirmé que le démonstrateur de scellement de descenderie sera mis en œuvre dès le début du creusement mais que les modalités opérationnelles de sa surveillance ne sont pas précisément définies à ce stade (absence de schéma détaillé de l'instrumentation, essais envisagés et techniques d'auscultation de la roche en paroi non définis). Compte tenu des délais nécessaires pour définir, concevoir et mettre en place les démonstrateurs envisagés, **l'IRSN alerte sur le fait que ce programme de démonstration pourra difficilement être mis en place dès le début du creusement.**

Par ailleurs, l'IRSN estime que les preuves de démonstration de concept pour le scellement de galerie ne devront pas être apportées à l'échéance de la fermeture des quartiers de stockage (pilote, MA-VL et HA), mais devront être disponibles dès le bilan de la phase pilote, dont le rôle est précisément de conforter les données utilisées pour la conception et la démonstration de sûreté en conditions réelles d'environnement, de construction et de fonctionnement.

En conclusion, l'IRSN constate que les concepts de scellement retenus par l'Andra et présentés dans le DDAC sont encore à un stade de principes de conception. L'IRSN considère que même s'il est très probable que ces concepts seront amenés à évoluer d'ici leur mise en place envisagée aujourd'hui à des échéances lointaines, il est essentiel que des concepts complets, c'est-à-dire incluant les méthodes d'auscultation préalables de la roche, les techniques de mise en place et les moyens de contrôle de la bonne exécution des travaux, soient définis, et que des éléments probants quant au caractère opérationnel de ceux-ci soient réunis au terme de la phase pilote, en s'appuyant sur les démonstrateurs *in situ* prévus à cet effet. En effet, l'évaluation de sûreté en support à la mise en service « complète », qui sera autorisée après la phase pilote (cf. chapitre 2.4.1), doit être confortée par une solution de fermeture opérationnelle et performante, compte tenu du caractère fondamental de ce système au regard de la sûreté après fermeture du stockage. **Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra présenter, en vue du bilan de la phase pilote, un concept complètement défini pour chaque scellement (puits, descenderies et galeries) s'appuyant sur des résultats tangibles apportés notamment par les démonstrateurs *in situ*, en termes de caractère opérationnel et, pour les scellements de LSF, de performances atteintes.** Selon l'IRSN, un tel concept complet devra s'appuyer sur la mise en œuvre opérationnelle de démonstrateurs, depuis le retrait des portions de revêtement/soutènement jusqu'à la mise en œuvre des massifs d'appui en béton et/ou des remblais, qui incluent les moyens d'auscultation préalables de la roche et le contrôle de la bonne exécution des travaux, ainsi que la qualification des matériaux et des composants.

À cet égard, l'Andra a pris l'**engagement 2024-E-15** par lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 (cf. Annexe A2). L'IRSN estime cet engagement satisfaisant.

9. ADAPTABILITE DE CIGEO A L'INVENTAIRE DE RESERVE

Pour rappel, l'inventaire de réserve présenté dans le DDAC, décrit aux chapitres 2.6 et 3.3 du présent rapport, est défini par les scénarios industriels prospectifs SR1 (allongement de la durée de fonctionnement de certains réacteurs du parc actuel à 60 ans) et SNR enveloppe (arrêt de la production électronucléaire), auxquels sont ajoutés des déchets FA-VL. L'Andra prévoit de compléter cet inventaire de réserve, en préalable à l'enquête publique relative à la demande d'autorisation de création de Cigéo, par les déchets issus du projet NNF (six EPR2), ainsi que par les déchets supplémentaires qui seraient produits en cas d'un prolongement de l'ensemble du parc actuel à 60 ans, sur la base des deux scénarios de multi-recyclage et d'arrêt du recyclage (cf. chapitre 3.3.2). L'inventaire résultant de l'ajout des déchets issus du projet NNF et d'un prolongement de l'exploitation du parc actuel à 60 ans est appelé ci-après inventaire de réserve « augmenté ». L'IRSN relève que les déchets des huit EPR2 en option ainsi que les déchets des SMR en projet ne sont pas pris en compte dans cet inventaire augmenté.

Comme détaillé au chapitre 2.6 du présent rapport, l'Andra conserve, pour ses études d'adaptabilité de Cigéo au stockage des colis de l'inventaire de réserve, les grands principes d'architecture de Cigéo (stockage sur un seul niveau à environ 500 m de profondeur dans le COX, ouvrages borgnes, regroupement de la base des LSF, séparation des quartiers HA-CU, MA-VL et FA-VL, entraxe entre les alvéoles). Il en est de même pour celles relatives à l'inventaire de réserve augmenté. Les concepts d'alvéoles de stockage des colis FA-VL et des CU sont similaires respectivement à ceux des colis MA-VL et des colis HA.

Les connaissances associées aux inventaires de réserve et de réserve augmenté sont analysées par l'IRSN au chapitre 3.3. Le présent chapitre concerne l'évaluation par l'IRSN de l'adaptabilité de l'installation à ces inventaires de réserve, en termes d'emprise du stockage au regard des critères définis en 2008 (cf. *infra*). Cet examen de l'adaptabilité de Cigéo est complété, dans le cadre des GP2 et GP3, au regard d'autres enjeux relatifs à la sûreté de l'installation en exploitation (e.g. dimensionnement d'ouvrages et d'équipements, durée d'exploitation...) et après sa fermeture (performance de confinement). L'IRSN souligne en outre que les évaluations qualitatives préliminaires relatives à l'évolution du COX, notamment en termes de transitoires hydraulique-gaz et géomécanique, apportées par l'Andra au cours de l'instruction, ne mettent pas en évidence à ce stade d'élément rédhibitoire vis-à-vis du caractère adaptable de Cigéo.

Au stade du DDAC, les quartiers de stockage HA et MA-VL de l'inventaire de référence occupent une surface dans la ZIOS d'environ 8 km² et 1,5 km² respectivement. L'inventaire de réserve associé au scénario SR1, cumulé au stockage des déchets FA-VL, conduit d'après l'Andra à une emprise du stockage restant dans la ZIOS, avec une surface du quartier HA de 10 km² et d'un peu plus de 2 km² pour l'ensemble formé par le quartier MA-VL complété plus à l'est par le quartier FA-VL (cf. chapitre 2.6). Le scénario SNR enveloppe complété par l'hypothèse d'un stockage de déchets FA-VL, dont l'emprise est illustrée en Figure 20, conduit, du fait de la taille du quartier de stockage HA-CU, à une emprise dépassant de plusieurs centaines de mètres à un kilomètre les limites nord, est et ouest de la ZIOS.

Pour l'inventaire de réserve augmenté, les premières estimations de l'Andra indiquent que dans le cas du scénario SR1 augmenté, complété par les déchets FA-VL, l'emprise du quartier HA atteindrait 15 km² (à comparer aux 10 km² précités) et dépasserait de quelques centaines de mètres les limites de la ZIOS dans l'hypothèse de son extension vers l'ouest et l'est, tandis que l'emprise correspondant aux quartiers MA-VL et FA-VL atteindrait jusqu'à 2,5 km² (à comparer aux 2 km² précités) avec l'ajout d'un second quartier MA-VL à l'est du quartier FA-VL précité (ceux-ci restant dans la ZIOS). Pour le scénario SNR enveloppe augmenté, complété par les déchets FA-VL, le stockage serait agrandi d'environ deux sous-quartiers de stockage de CU supplémentaires (soit environ une emprise supplémentaire de 4 km² au total) et l'emprise de l'installation pourrait être étendue en prolongeant les galeries d'accès du quartier CU vers l'est, ce qui conduirait notamment à une extension du stockage vers l'est de près de 3 km au-delà de la ZIOS. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que ces éléments seront précisés dans le cadre du GP3.

S'agissant de l'emprise du stockage vis-à-vis des limites de la ZIOS, l'IRSN relève que l'Andra privilégie une extension du stockage des colis HA ou CU vers l'est. Pour rappel, dans le Dossier 2005, l'Andra avait défini la ZT (250 km², cf. Figure 1), une zone au sein de laquelle les connaissances acquises au LSMHM pourraient être transposées, pour démontrer la faisabilité de principe du stockage et en vue de l'implantation de l'installation de stockage (cf. Annexe T2). Elle était définie par un éloignement des failles du secteur, par l'apparition d'incursions plus silteuses dans les argilites autour du synforme d'Aulnois au nord, par une épaisseur minimale de 130 m du COX (au sud de la ZT) et une profondeur maximale de 630 m (à l'ouest de la ZT). L'IRSN avait notamment conclu de son expertise de ce dossier au caractère transposable à la ZT de l'ensemble des connaissances acquises au LSMHM et à la faisabilité d'un stockage géologique de déchets HA/MA-VL en formation argileuse dans la ZT [9].

L'IRSN rappelle également qu'après avoir mené des investigations complémentaires en 2007-2008 dans la ZT, l'Andra a retenu la ZIRA (30 km²) au sein de la ZT, délimitant des terrains présentant notamment les caractéristiques suivantes, considérées comme plus particulièrement propices à l'implantation du futur stockage :

- une épaisseur de la formation hôte de plus de 140 m,
- un gradient de charge hydraulique inférieur à 0,2 m/m,
- une profondeur du milieu de la couche ne dépassant pas 600 m,
- une épaisseur réduite de couches karstiques (Barrois) à traverser pour établir les liaisons jour-fond.

Dans son avis formulé en 2009 sur le choix par l'Andra de la ZIRA [12], l'IRSN estimait ces critères techniques pertinents et, sur la base des résultats des investigations de 2007-2008, renouvelait ses conclusions de 2005 sur la faisabilité d'un stockage en formation argileuse dans la ZT et *a fortiori* dans la ZIRA.

L'IRSN observe que l'emprise du stockage des déchets des inventaires de réserve et de réserve augmenté, quel que soit le scénario d'adaptabilité mentionné *supra*, reste dans la ZT et qu'à sa connaissance, aucune donnée nouvelle acquise depuis 2008 ne remet en cause ses conclusions émises en 2005 sur la faisabilité d'un stockage dans la ZT. Néanmoins, la faisabilité d'un stockage dans l'ensemble de la ZT n'implique pas nécessairement que la conception du stockage (architecture globale du stockage, concepts d'alvéoles) retenue pour l'inventaire de référence au stade du DDAC soit appropriée pour l'ensemble de la ZT et pour tout autre type de déchets.

A cet égard, les connaissances sur les propriétés et la géométrie du COX au-delà de la ZIOS (qui correspond à la ZIRA et au volume des LSF, cf. chapitre 2.1.1) présentées dans le DDAC sont celles acquises en 2008 (choix de la ZIRA, cf. [12]). D'après cet état des connaissances, l'épaisseur du COX devient inférieure à 140 m au-delà de la bordure ouest de la ZIOS, la profondeur du milieu de la couche de 600 m est atteinte au-delà de la limite nord-ouest de la ZIOS et les failles de Gondrecourt sont proches de la bordure est de la ZIOS. Ces trois caractéristiques ont potentiellement un impact, respectivement sur le maintien d'une épaisseur minimale de 50 m de garde saine du COX, sur le comportement mécanique du COX (notamment son endommagement par le creusement et le dimensionnement des soutènements), ainsi que sur l'aléa sismique et le transport des particules relâchées depuis le stockage jusqu'aux exutoires. Sur ce dernier point, l'IRSN souligne qu'une extension du stockage au-delà de la limite nord-ouest actuelle de la ZIOS conduirait à une augmentation du gradient ascendant à travers le COX et que l'élargissement de l'emprise du stockage vers le nord conduit *de facto* à un rapprochement de certains des exutoires hydrauliques du stockage (exutoire de l'Oxfordien rapproché de 2 km, donc atteint environ 50 000 ans plus tôt) ; ce point est repris dans le cadre du GP3 relatif à la sûreté après fermeture. Aussi, l'IRSN estime que, si l'installation devait être adaptée pour stocker tout ou partie des déchets des inventaires précités (inventaire de réserve ou inventaire de réserve augmenté), il conviendrait que le dossier remis en support à la demande d'autorisation afférente présente une évaluation de l'impact des caractéristiques mentionnées ci-dessus, sur la base notamment des données géologiques du COX (géométrie du COX, variations minéralogiques...) existantes ou à venir. En outre, l'IRSN rappelle, ainsi qu'indiqué au chapitre 5.1.2 du présent rapport, qu'il importe de vérifier que les propriétés du COX ne sont pas dégradées à l'aplomb des failles nord-sud affectant le Trias-Lias au nord de la ZIOS ainsi qu'au-delà de celle-ci.

Enfin, l'IRSN relève que l'évaluation par l'Andra de l'extension du stockage correspond au nombre d'alvéoles strictement nécessaires au stockage des inventaires de réserve et de réserve augmenté, sans que les incertitudes associées ne soient précisées à ce stade. Or, comme tout projet industriel, et plus encore pour tout projet minier d'envergure, il ne peut être exclu que la localisation de certains ouvrages ait à être modifiée, ou qu'ils ne puissent être exploités, pour respecter *in fine* les exigences fixées, ce qui conduirait à une emprise plus importante que celle initialement estimée. L'IRSN estime que ce type d'incertitude devrait être pris en compte dans les évaluations de l'emprise de l'installation de stockage, quel que soit l'inventaire considéré.

Aussi, compte tenu de l'ensemble des éléments ci-avant, l'IRSN estime nécessaire que l'Andra évalue dans ses études d'adaptabilité de Cigéo, en vue du bilan de la phase pilote, l'impact sur la sûreté de l'extension du stockage à des zones de la ZT où les valeurs des critères de choix de site seraient différentes de celles retenues pour définir la ZIOS, en tenant compte d'incertitudes relatives à l'inventaire ainsi qu'aux aléas de construction de l'installation. Ce point fait l'objet de l'[engagement 2024-E16](#) de la lettre Andra DG-24-0123 du 7 mars 2024 rappelée en Annexe A2 du présent rapport. L'IRSN estime que cet engagement est satisfaisant.

En conclusion, l'IRSN n'a pas identifié à ce stade de l'examen (GP1) d'élément de connaissances relatives à la géologie, au regard des critères de choix de site, qui remette en cause l'adaptabilité de Cigéo aux inventaires de réserve présentés par l'Andra. L'IRSN rappelle toutefois que Cigéo est conçu en premier lieu pour la gestion des déchets produits pendant l'exploitation et le démantèlement de l'ensemble des installations nucléaires en fonctionnement ou ayant obtenu leur décret d'autorisation de création avant 2016 (inventaire de référence). Bien que les études présentées apportent un éclairage sur l'adaptabilité à des scénarios industriels prospectifs, l'IRSN observe qu'au stade actuel de développement et au vu des connaissances relatives au site, la capacité de stockage de cette installation ne paraît pas pouvoir être développée de manière illimitée. Dans l'hypothèse d'un éventuel futur parc (huit EPR2 supplémentaires, SMR, RNR, etc.), la capacité de l'installation à stocker davantage de déchets devra être évaluée sur la base de nouvelles études d'adaptabilité à des horizons temporels qui pourront être définis lorsque les décisions afférentes à ce futur parc auront été prises.

10. CONCLUSION

Le dossier de demande d'autorisation de création (DDAC) pour le stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs HA et MA-VL marque une étape essentielle dans le processus de mise en œuvre du projet Cigéo. L'ASN a souhaité organiser l'expertise de ce dossier selon trois groupements thématiques, avec en premier lieu les données de base retenues pour l'évaluation de sûreté de Cigéo, puis la démonstration de sûreté en phase d'exploitation et enfin celle après la fermeture de l'installation.

Le présent examen par l'IRSN, qui porte sur le premier groupement thématique, a pour objectif principal d'évaluer la complétude et la pertinence des connaissances retenues pour l'évaluation de sûreté concernant les déchets, le site, les propriétés de la roche du Callovo-Oxfordien (COX) et les matériaux cimentaires et métalliques utilisés pour concevoir le stockage ainsi que les ouvrages de scellement.

L'IRSN estime que l'Andra a développé un socle de connaissances sur le site de Meuse/Haute-Marne, la formation du Callovo-Oxfordien, les matériaux cimentaires et les colis de déchets, qui réunit des données suffisantes pour l'évaluation de la sûreté de Cigéo au stade du DDAC. Ces connaissances reposent sur des caractérisations hydrogéologiques et géotechniques détaillées, une évaluation pertinente des aléas météorologiques et une compréhension adéquate des propriétés du COX, des matériaux cimentaires et des colis, ainsi que de leur évolution sous l'effet des perturbations transitoires thermique, hydrique, mécanique et chimique. Des voies d'améliorations ont été identifiées par l'IRSN pour réduire certaines incertitudes. A cet égard, l'IRSN souligne en particulier celles relatives à l'estimation de la pression maximale de gaz dans le stockage et le besoin de mettre en place une méthode in-situ pour garantir la compatibilité de la roche avec les pressions exercées.

Concernant les inventaires de référence et de réserve, les éléments présentés par l'Andra témoignent d'une bonne vision d'ensemble bien que des incertitudes subsistent, susceptibles d'impacter le nombre d'alvéoles et les chroniques de stockage. L'IRSN estime que les données relatives à l'inventaire de référence et à l'inventaire de réserve sont cohérentes avec la politique énergétique en vigueur et globalement pertinentes, respectivement pour la démonstration de sûreté de Cigéo et pour les études d'adaptabilité aux scénarios industriels prospectifs retenus. Dans l'hypothèse d'un éventuel futur parc (huit EPR2 supplémentaires, SMR, RNR, etc.), la capacité de l'installation à stocker davantage de déchets devra être évaluée sur la base de nouvelles études d'adaptabilité à des horizons temporels qui pourront être définis lorsque les décisions afférentes à ce futur parc auront été prises.

A ce stade de l'expertise du DDAC, les principaux points d'attention de l'IRSN concernent les données disponibles pour l'évaluation de sûreté relatives aux alvéoles HA et aux ouvrages de scellement.

Ainsi, les campagnes de reconnaissance géologique de sismique 3D font apparaître une incertitude sur l'extension verticale des failles détectées dans le Trias-Lias au droit de la partie nord du futur quartier de stockage HA. L'IRSN estime que cette incertitude sur d'éventuelles flexures au niveau de la roche hôte devra être levée dans le cadre d'un programme de reconnaissance à l'aplomb de ces failles au cours de la phase pilote. Par ailleurs, concernant l'évolution des aciers du chemisage des alvéoles HA et des conteneurs de stockage, l'IRSN constate que la première formulation du matériau cimentaire de remplissage de l'espace annulaire (MREA) entre la roche et le chemisage, testée par l'Andra au stade du DDAC, conduit à des vitesses de corrosion qui ne permettent pas de garantir les fonctions attribuées à ces composants. Il est attendu que le programme de recherche en cours avec d'autres formulations de ce matériau, dont les premiers résultats sont prometteurs selon l'Andra et qui devra être précisé en vue du GP3, permette de disposer des données, avant le creusement du premier alvéole du quartier pilote destiné à recevoir des colis HA, justifiant la pertinence du dimensionnement retenu.

Concernant les ouvrages de scellement, les concepts de référence « passants au gaz » désormais retenus pour diminuer la pression de gaz dans le stockage sont encore au stade de principes de conception. L'IRSN considère que la définition des concepts de référence complets de chaque type de scellement (puits, descenderies et galeries), non consolidés au stade du DDAC, et la démonstration in situ de leur opérationnalité devront être apportées pendant la phase pilote. Par ailleurs, au vu du rôle essentiel des ouvrages de scellement pour la sûreté après fermeture, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter, avant le creusement des puits, une méthode de

creusement qui ne crée pas plus d'endommagement de la roche qu'une méthode mécanique, au moins au droit des futures zones à sceller.

L'IRSN estime que ces points d'attention ne constituent pas un obstacle à la création des premiers ouvrages de Cigéo et considère que les objectifs de la phase pilote doivent conduire à consolider les données de base de l'évaluation de sûreté sur ces points. Le présent examen est complété par celui de la démonstration de sûreté en exploitation et après fermeture dans le cadre des GP2 et GP3.

RECOMMANDATIONS

Recommandation n°1

L'IRSN recommande que l'Andra mette en œuvre un programme de reconnaissance du Callovo-Oxfordien dans le nord de la ZIOS (quartiers de stockage HA) à l'aplomb des failles nord-sud identifiées dans le Trias-Lias sur la sismique 3D dans le but de lever le doute, en vue du bilan de la phase pilote et en tout état de cause avant le creusement des galeries de liaison qui desserviront le quartier de stockage HA, sur l'éventuel impact de ces failles sur les propriétés du Callovo-Oxfordien.

Recommandation n°2

L'IRSN recommande que l'Andra présente, avant le creusement des puits, la méthode de creusement qu'elle retient, au moins localement au droit des futures zones à sceller, pour ne pas créer plus d'endommagement de la roche qu'avec une méthode de creusement mécanique.

LISTE DES ACRONYMES

AEN	Agence de l'énergie nucléaire
AIP	Activité importante pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement
AMR	Advanced Modular Reactor (réacteur modulaire avancé)
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
APD	Avant-projet détaillé
APS	Avant-projet sommaire
AVM	Atelier de vitrification de Marcoule
BRH	Brise-roche hydraulique
CAC	Conteneur amiante ciment
C1PG ^{SP}	Colis d'EDF contenant des déchets activés d'exploitation et de démantèlement
CBF-C'2	Conteneur béton fibres pour déchets technologiques
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEC	Coques et embouts cimentés
CNE	Commission nationale d'évaluation
COX	Callovo-Oxfordien
CSA	Centre de stockage de l'Aube
CSD-C	Conteneur standard de déchets compactés
CSD-S	Conteneur standard de déchets vitrifiés
CSD-V	Conteneur standard de déchets contenant des capsules de titanate de strontium
CSM	Centre de stockage de la Manche
CU	Combustible utilisé
DAIE	Demande d'Autorisation d'Installation et d'Exploitation d'un laboratoire souterrain
DAC	Demande d'autorisation de création
DDAC	Dossier de demande d'autorisation de création
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DIADEM	Déchets radioactifs irradiants ou alpha de démantèlement (Cadarache)
DOS	Dossier d'options de sûreté
DSC	Descenderie « colis »
DSI	Descenderie intermédiaire
DSS	Descenderie « de service »
D&E	Demandes de l'ASN, engagements de l'Andra et recommandations des GPE
EDF	Electricité de France
EIP	Élément important pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L.593-1 du code de l'environnement
EL4	Réacteur à eau lourde n°4 (Brennilis)
EP1, EP2	Bâtiments nucléaires de surface 1 et 2
EPR, EPR2	Réacteur à eau pressurisée de 3 ^{ème} génération
ET-H	Bâtiment de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal
FA-VL	Faible activité vie longue
FGR	Fraction de gaz relâché en réacteur
FI	Faiblement irradiant
GPD	Groupe permanent d'experts pour les déchets
GPE	Groupe permanent d'experts
GPU	Groupe permanent d'experts pour les laboratoires et usines
HA	Haute activité
HNC	Hydrocarbures « non conventionnels » (i.e., extraits par usage de techniques non conventionnelles)

IN	Inventaire national
INB	Installation nucléaire de base
IRF	Instant fraction release
ISA	Acide iso-saccharinique
ITER	Réacteur thermonucléaire expérimental international
LSF	Liaison(s) surface-fond (puits, descenderies, colonne à carburant)
LSMHM	Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (Andra)
MA-VL	Moyenne activité vie longue
MHM	Meuse/Haute-Marne
MMT	Puits d'évacuation des matériels et matériaux de construction de la « zone travaux »
MOX	Mixed oxydes (mélange d'oxydes)
NNF	Nouveau nucléaire français
OPECST	Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
PDD	Plan de développement des composants du projet Cigéo
PDIS	Plan de développement de l'INB de stockage
PIGD	Plan industriel de gestion des déchets
PIVER	Installation pilote de vitrification (Marcoule)
PIVIC	Procédé d'incinération vitrification <i>in can</i>
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
REP	Réacteur à eau pressurisée
RES	Réacteur d'essais au sol
RIO	Repère inférieur oolithique
RSO	Repère supérieur oolithique
RNR	Réacteur à neutrons rapides
RTR	Réacteur de test et de recherche
SEN	Scénario d'évolution normale
SMPP	Spectre maximal physiquement possible (spectre sismique après fermeture)
SMR	Small modular reactor (petit réacteur modulaire)
SNR	Scénario de non-renouvellement
SR1	Scénario de renouvellement 1
SR2	Scénario de renouvellement 2
SR3	Scénario de renouvellement 3
SRI	Situation de référence pour le risque inondation
STE2	Station de traitement des effluents n°2 (La Hague)
STE3	Station de traitement des effluents n°3 (La Hague)
STEL	Station de traitement des effluents liquides (Marcoule)
T1, TU	Tranche 1, tranches ultérieures
TAP	Tunnelier à attaque ponctuelle
TBM, TBMr	Tunnel Boring Machine (tunnelier à attaque pleine face), TBM rétractable
TBP	Tributylphosphate
TCP	Traitement des combustibles particuliers
THM	Thermo-hydro-mécanique
UMo	Verre enrichi en molybdène
UA	Unité argileuse du COX
UNE	Uranium naturel enrichi
UNGG	Uranium naturel graphite gaz
UOX	Oxyde d'uranium
URE	Uranium de retraitement enrichi
USC	Unité silto-carbonatée du COX

UT	Unité de transition du COX
VFE	Puits de transfert du personnel et à l'apport d'air frais de la « zone exploitation »
VFT	Puits de transfert du personnel et à l'apport d'air frais de la « zone travaux »
VVE	Puits de retour d'air vicié de la « zone exploitation »
VVT	Puits de retour d'air vicié de la « zone travaux »
ZBS	Campagne de forages ZIOS <i>Boreholes Survey</i>
ZFC	Zone fracturée connectée
ZFD	Zone fracturée discrète
ZIOS	Zone d'implantation des ouvrages souterrains (2023)
ZIRA	Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (2009)
ZSL	Zone de soutien logistique
ZSLE	Zone de soutien logistique « exploitation »
ZSLT	Zone de soutien logistique « travaux »
ZT	Zone de transposition des données du LSMHM

RÉFÉRENCES

- [1] Lettre ASN/CODEP-DRC-2023-030596 du 7 juin 2023. Examen du dossier de demande d'autorisation de création du projet Cigéo - Saisine n° SAISI-DRC-2023-0093.
- [2] Lettre ASN/CODEP-DRC-2024-010770 du 8 mars 2024. Examen du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation Cigéo. Réunion du GP n°1. Saisine n° SAISI-DRC-2023-0131.
- [3] Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.
- [4] ASN. Guide n°1 de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12 février 2008
- [5] Délibération du conseil d'administration de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs du 5 mai 2014 relative aux suites à donner au débat public sur le projet Cigéo.
- [6] Lettre ASN/DRC- 2014-039834 du 19 décembre 2014 – « Options de sûreté du projet Cigéo » - Éléments nécessaires à l'instruction du dossier d'options de sûreté.
- [7] Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2016/7/25/DEVX1614324L/jo/texte>
- [8] Lettre Andra DG/16-0105 du 6 avril 2016.
- [9] Rapport IRSN DSU n°106, Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2005 Argile », présenté devant le GPD les 12-13 décembre 2005.
- [10] Avis GPD/05-16, Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 12/12/2005 et du 13/12/2005 – Stockage Géologique – Examen du « Dossier 2005 Argile ».
- [11] Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV.
- [12] Avis DSU n°2009-166 du 22 décembre 2009 sur le choix d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie.
- [13] Lettre n°2010-AV-0084 du 5 janvier 2010 relative à la proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface pour un stockage réversible en formation géologique profonde.
- [14] Rapport IRSN/2010-00002, Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2009 – Projet HA-MAVL » et sur le « DAIE ».
- [15] Avis CODEP-MEA-2010-068480, Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 29/11/2010 – Dossier 2009 pour le projet HA-MAVL et demande de renouvellement de l'autorisation d'exploitation du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.
- [16] Avis ASN CODEP-DRC-2011-002092, Examen du « Dossier 2009 » relatif au projet HA-MAVL présenté devant le GPD les 29-30 novembre 2010.
- [17] Avis IRSN N°2013-00159 du 26 avril 2013 sur les évolutions du projet Cigéo au stade « Jesq03 » depuis le Dossier 2009. <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/AVIS-IRSN-2013-00159.pdf>
- [18] Lettre ASN CODEP-DRC-2013-033414 du 18 nov 2013 - Dossier Projet Cigéo Esquisse Jesq03 (2012) - Document de synthèse des évolutions par rapport au Dossier 2009 et impact sur la sûreté.

- [19] Rapport IRSN/IRSN 2013-00001, Projet Cigéo – Examen des études remises depuis 2009, présenté devant le GPD le 5 février 2013.
- [20] Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » du 5 février 2013, « Avis relatif au projet de stockage CIGEO - Examen des études remises depuis 2009 ».
- [21] Avis n°2013-AV-179 du 16 mai 2013 de l'ASN sur les documents produits par l'Andra depuis 2009 relatifs au projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [22] Rapport IRSN N°2014-00006, « Projet de stockage Cigéo – Ouvrages de fermeture », présenté devant le GPD le 1er juillet 2014. http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Dechets/IRSN-GP_Cigéo-2014.pdf
- [23] Avis CODEP-MEA-2014-030920 du Groupe Permanent « Déchets » du 01/07/2014 relatif au projet de stockage Cigéo – Examen du dossier « Ouvrages de fermeture ».
- [24] Lettre ASN CODEP-DRC-2014-039040 du 9 octobre 2014 - Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde — ouvrages de fermeture ».
- [25] Rapport IRSN N°2014-00010 « Examen de la maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo », présenté devant le GPD et le GPU le 10 décembre 2014. http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf
- [26] Avis et recommandations CODEP-MEA-2014-056324 des Groupes Permanents « Déchets » et « Usines » du 10/12/2014 relatif au Projet de stockage Cigéo - Examen du dossier "maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo".
- [27] Lettre ASN CODEP-DRC-2015-004834 du 7 avril 2015 - Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde – maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo ».
- [28] Avis IRSN-0348 du 6 novembre 2015 « Plan de développement des composants du projet Cigéo » <http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/AVIS-IRSN-2015-00348.pdf>
- [29] Lettre ASN CODEP-DRC-2016-005220 du 20 juin 2016 – « Plan de développement des composants du projet Cigéo ».
- [30] Rapport IRSN N°2017-00013. Projet de stockage Cigéo – Examen du Dossier d'Options de Sûreté.
- [31] Avis et Recommandations du Groupe Permanent « Déchets » et « Usines » du 12 janvier 2018 - Dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - CODEP-DRC-2018-001635.
- [32] Avis n°2018-AV-0300 du 12 janvier 2018 de l'ASN relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.
- [33] Lettre Andra DG/23.008 du 16 janvier 2023. Dossier de demande d'autorisation de création (DAC) pour une installation de stockage réversible en couche géologique profonde
- [34] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Tome I du référentiel de site - L'histoire géologique et l'état actuel - CG-TE-D-RAP-AMOA-GEO-0000-20-0003-A
- [35] Retraitement et interprétation de profils sismiques 2D pour la révision du schéma structural de la partie nord de la zone de fracturation diffuse et de la faille de Poissons – Rapport final. CG-RP-FGEO-22-009/A.
- [36] Andra - Pièce 6 - Étude d'impact du projet global Cigéo - Volume II - Justification et description du projet global Cigéo - CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-V002-22-0005-A

- [37] Andra - Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description de l'INB et de son environnement - Volume 4 - Le site d'implantation de l'INB et son environnement - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V004-21-0007-A
- [38] Andra - Note conceptuelle : Le transfert des radionucléides - CG -TE-D-NTE-AMOA -OBS -0000-19-0004/A
- [39] Andra - Pièce 0 - Présentation non technique - CG-TE-D-PRE-AMOA-PU0-0000-21-0026-A
- [40] Andra - Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description et fonctionnement du centre de stockage - Volume 5 - Les installations, ouvrages et équipements - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V005-21-0007-A
- [41] Andra - Dossier de justification de la conception des liaisons surface-fond - CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0046-A
- [42] Andra - Coupes descenderie colis - CG-TE-D-PLA-SCVG-ASU-4000-17-0003-A
- [43] Andra - Coupes descenderie service - CG-TE-D-PLA-SCVG-ASU-4000-17-0007-A
- [44] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - Le comportement mécanique des ouvrages d'accès (puits et descenderie) et des ouvrages souterrains (alvéoles MA-VL et galeries) pendant la phase de fonctionnement réversible - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-19-0047-A
- [45] Andra - Pièce 20 - Plan de développement de l'INB du centre de stockage - CG-TE-D-PDD-AMOA-SDR-0000-19-0002-A
- [46] Andra - La stratégie de reconnaissance à l'avancement. CG-TE-D-NTE-AMOA-INS-0000-23-0006/A
- [47] Andra - Coupes puits - CG-TE-D-PLA-AMOA-GCS-4000-22-0001-A
- [48] Pièce 7 - VPRS - PARTIE III : démonstration de sûreté - Volume 8 - La démonstration de sûreté après fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V008-21-0007-A
- [49] Andra -Dossier de justification de la conception de l'alvéole HA - CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0044-A
- [50] Andra - Dossier de justification de la conception de l'alvéole MA-VL. CG-TE-D-DJC-AMOA-ASU-0000-19-0045/A
- [51] Andra - Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description de l'INB, de son environnement - Volume 3 - Les colis de déchets - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V003-21-0007-A
- [52] Andra - Dossier de justification de la conception des conteneurs de stockage HA - CG-TE-D-DJC-AMOA-CS0-0000-19-0002-A
- [53] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - L'évolution chimique des alvéoles MA-VL et du Callovo-Oxfordien en champ proche - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0009-A
- [54] Andra - Dossier de justification des choix de conception pour les conteneurs de stockage des colis MA-VL - CG-TE-D-DJC-AMOA-CS0-0000-19-0003-A
- [55] Andra - Pièce 16 - Plan directeur de l'exploitation - CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-19-0001-A
- [56] Andra - Pièce 13 - Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance - CG-TE-D-PDG-AMOA-OBS-0000-19-0001-A
- [57] Andra - Dossier de justification de la définition des ouvrages de fermeture - CG-TE-D-DJC-AMOA-FER-0000-19-0045-A

- [58] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - L'évolution phénoménologique des scellements de Cigéo (après fermeture) - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0011-A
- [59] Andra - Démarche d'élaboration des inventaires de l'INB du centre de stockage Cigéo - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0014-A
- [60] Andra - Décret n° 2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. [Décret n° 2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs - Légifrance \(legifrance.gouv.fr\)](#)
- [61] Andra - Projet nouveau nucléaire français – Evaluation de l'impact sur les filières de gestion des déchets – Z-NT-ADG-21-0022 – Andra, 08/07/2021
- [62] Andra - Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo - Études relatives à l'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de déchets de l'inventaire de réserve - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-21-0016-A
- [63] Rapport IRSN n°2018-00004. Stratégie d'Orano pour la gestion de ses déchets et du démantèlement de ses installations.
- [64] Lettre ASN CODEP-DRC-2019-006483 du 27 mai 2019. Stratégie de démantèlement et de gestion des matières et déchets du CEA.
- [65] Rapport IRSN n°2018-00012. Stratégie de démantèlement des installations du CEA et mise à jour de la stratégie de gestion des matières et déchets radioactifs.
- [66] Décision n° 2017-DC-0587 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 23 mars 2017 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage
- [67] Andra - Inventaire de référence retenu pour la conception et la démonstration de sûreté de l'INB Cigéo au stade des études d'avant-projet - CG-TE-D-NTE-AMOA-CS0-0000-20-0002-A
- [68] Avis IRSN n°2020-00165. Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des capsules de titanate de strontium issues de l'atelier Elan II B en colis CSD-S.
- [69] Avis IRSN n°2019-00238. Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement d'Orano selon la spécification de production de colis standard de déchets vitrifiés (CSD-V) en pot de fusion DI RP SP 16-00258.
- [70] Avis IRSN n°2014-00323. Etablissement AREVA de La Hague. INB 117 – atelier R7. Vitrification en creuset froid des solutions issues du traitement de combustibles UOX et MOX.
- [71] Avis IRSN n°2014-00264. AREVA NC – Etablissement de La Hague. Colis standard de déchets issus de la gestion des reliquats de verre à l'issue des campagnes de production des CSD-U (CSD-RU) – Spécification DIRP SP 12-00082.
- [72] Avis IRSN n°2023-00117. Poursuite du conditionnement en colis C1PGSP sur Iceda au-delà du 31 décembre 2023 – Compléments des études colis intégrées au référentiel de conditionnement à l'indice F.
- [73] Avis IRSN n°2021-00139. Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des fines et résines du silo HAO en colis CFR HAO.
- [74] Avis IRSN n°2017-00393. Avis relatif à la demande d'autorisation de conditionnement des débris de dissolvant dans des CSD-C selon la spécification 300 AQ 055.

- [75] Avis IRSN n°2017-00330. Avis relatif à la demande d'approbation de la spécification de production du colis CSD-C HAO.
- [76] Avis n°2020-AV-0369 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er décembre 2020 sur les études concernant la gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL), remises en application du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018, en vue de l'élaboration du cinquième plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs.
- [77] Andra - Pièce 7 - VPRS - PARTIE IV : volumes complémentaires répondant au III de l'article R. 593-16 du code de l'environnement - Volume 11 - La flexibilité de l'exploitation de l'INB - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V011-21-0007-A
- [78] Avis IRSN n°2020-00125. Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des colis de déchets 500 L MI de l'INB n°37-A du CEA.
- [79] Avis IRSN n°2020-00126. Avis relatif à la demande d'accord de conditionnement des colis de déchets 870 L FI de l'INB n°37-A du CEA.
- [80] Andra - Pièce 7 - VPRS - PARTIE IV : volumes complémentaires répondant au III de l'article R. 593-16 du code de l'environnement - Volume 12 - L'adaptabilité de l'INB au stockage des colis de l'inventaire de réserve - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V012-21-0007-A
- [81] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques -- CG-TE-D-LST-AMOA-TR0-0000-20-0001-A
- [82] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo – Les référentiels de connaissances – Le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques. VOLUME 1 et 2 - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0022-A
- [83] Andra - Inventaires radiologique et en toxiques chimiques pour les évaluations de sûreté après fermeture et distribution dans l'architecture – inventaire de référence. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0004/A.
- [84] Andra - Pièce 19 - Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis - (Version de travail du 13 juillet 2022 - CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-0000-19-0040-A
- [85] Avis IRSN n°2018-00207. Comportement physico-chimique des fûts d'enrobé bitumineux.
- [86] Avis IRSN n°2019-00291. Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs – Stockage en l'état des fûts de déchets bitumés dans Cigéo – Maîtrise des risques et principes d'évolution de conception.
- [87] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Tome II du référentiel de site
- [88] Andra - Pièce 6 - Etude d'impact du projet global Cigéo - Volume VII - Méthodes de réalisation - CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-V007-22-0005-A
- [89] Note technique Andra - CG-TE-D-NTE-SCVG-GEO-4000-16-0001, 16/05/2018 - « Andra - Projet Cigéo - Sous-système 4 - Note de synthèse géotechnique ZD et ZP des ouvrages de surface »
- [90] Note technique Andra - CG-TE-D-NTE-NCRS-GEO-2000-16-0015, 18/12/2018 - « Andra - Projet Cigéo - Sous-système 2 - Note d'hypothèses géotechniques »
- [91] Note technique Andra – CG-TE-D-RAP-CHYD-GEO-0000-15-0006 Indice A, 28/02/2017 - « Projet Cigéo-zone descendrière – Rapport mission géotechnique G2 – AVP »

- [92] Note technique Andra – CG-TE-D-RAP-CHYD-GEO-0000- 16-0004 A, 30/09/2016 - « Projet Cigéo – Zone descendrière – 2e campagne mission géotechnique GI – carottages, essais dilatométriques et analyses en laboratoire »
- [93] Note technique Andra – CG-TE-D-RAP-CHYD-GEO-0000-16-0005 A, 30/09/2016 - « Projet Cigéo – Zone descendrière 2e campagne mission géotechnique GI – essais pressiométriques »
- [94] Guide technique LCPC - LCPC éditions - IST Diffusion des éditions. ISBN : 2-7208-0374-X, Octobre 2004 - « Détection des cavités par méthodes géophysiques »
- [95] Pièce 6 - Étude d'impact du projet global Cigéo - Volume III - État actuel de l'environnement et facteurs susceptibles d'être affectés par le projet - CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-V003-22-0005-A
- [96] Pièce 6bis - Étude d'impact du projet global Cigéo - Résumé non technique - CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-V000-22-0005-A
- [97] Andra - CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0007/A, Décembre 2022 - « Note d'analyse des risques liés à inondation externe ».
- [98] Guide ASN - n°13, 11/04/2013 - « Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes ».
- [99] Note technique Andra - CG-TE-D-NTE-TGYA-CY0-0000-17-0001, 13/06/2018 - « Andra - Projet Cigéo - Détermination des pluies de projet »
- [100] Note technique Andra - CG-01-D-NTE-LGYA-VR0-5000-17-0038, 16/03/2020 - « Note de modélisation hydraulique du remontage système des zones « Descendrière » et « Puits »
- [101] Andra - CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-20-0007/A - « Note d'analyse des risques liés à inondation externe »
- [102] Andra - VPRS - PARTIE III : démonstration de sûreté - Volume 9 - La démonstration de sûreté en exploitation - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V009-21-0007-A
- [103] Rapport IRSN – IRSN N° 2021-00196, Mars 2021 - « Groupe de travail « Agressions externes » - Rapport de synthèse
- [104] Rapport IRSN - N° 2023-00142, 2023 - « Etat des connaissances, des pratiques et préconisations concernant les agressions vent et neige sur les Installations Nucléaires de Base - Groupe de travail « vent et neige »
- [105] ASN - CODEP-DCN-2021-017553CODEP-DRC-2021-017735, 27/05/2021 - « Aléas à retenir pour la protection des éléments importants pour la protection (EIP) à l'égard des tornades »].
- [106] Guide U.S. Nuclear Regulatory Commission - Regulatory Guide RG 1.76, Mars 2007 - « Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants ».
- [107] Nocquet J.-M., Calais E., 2003. Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001. *Geophysical Journal International* 154 (1), 72–88
- [108] Nocquet J.-M., 2012. Present-day kinematics of the Mediterranean : a comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics*, 579 (SI), p. 220-242.
- [109] Masson C., Mazzotti S, Vernant P., Doerflinger E., 2019. Extracting small deformation beyond individual station precision from dense Global Navigation Satellite System (GNSS) networks in France and western Europe. *European Geosciences Union, Solid Earth*, 10, p.1905–1920.
- [110] Gunsburger Y., Cornet F.H., 2006. Rheological characterization of a sedimentary formation from a stress profile inversion. *Geophysical Journal International*, Vol. 168, Issue 1, p. 402–418.

- [111] Cornet F., Röckel T., 2012. Vertical stress profiles and the significance of “stress decoupling”. *Tectonophysics*, Vol. 581, p. 193-205.
- [112] Kim Y-S., Sanderson D.J., 2005. The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Reviews*, Vol. 68, Issues 3–4, p. 317-334.
- [113] Document technique Andra - Mise à jour du schéma structural de la zone de fracturation diffuse – Traitement et interprétation sismique – Rapport final – CG-RP-FS3C-20-0027/A.
- [114] Pagel M., Bonifacie M., Schneider D. A., Gautheron C., Brigaud B., Calmels D., Cros A., Saint-Bezar B., Landrein P., Sutcliffe C., Davis D., Chaduteau C., 2018. Improving paleohydrological and diagenetic reconstructions in calcite veins and breccia of a sedimentary basin by combining $\Delta 47$ temperature, $\delta 18\text{O}$ water and U-Pb age. *Chemical Geology*, Vol. 481, p. 1-17.
- [115] Blaize T., Cathelineau M., Boulvais P., Techer I., Boiron M.-C., Tarantola A., Brigaud B., Landrein P. 2022. Origin of 87Sr enrichment in calcite cements in Jurassic limestones (Eastern Paris Basin, France). *Applied Geochemistry*, 136, 105131.
- [116] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - Modèle conceptuel du milieu géologique - CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-19-0010-A
- [117] Document technique Andra - Retraitement de quatre profils sismiques 2D intersectant la ZIRA et interprétation conjointe des données sismiques 2D/3D - Rapport final – CG-RP-FGEO-22-0010
- [118] Document technique Andra - Synthèse de l'interprétation de l'étude sismique 3D sur la ZIRA – D-RP-ASMG-11-0104
- [119] Document technique Andra - Campagne de reconnaissance de la zone de stockage (RZS) - Modèle géologique final utilisé pour les corrections statiques (OE_SZS3) de la sismique 3D 2010 – D-NT-ASMG-11-0020
- [120] Andra. Projet Cigéo - Présentation, du programme de forages profonds en limite de ZIOS - ZBS_FOND_UP1 - D-RP-ADCC-23-0002-A
- [121] Damon Adrien, Mazzotti Stéphane, Vernant Philippe, Vachon Rémi, Grosset Juliette, Ego Frédéric, Baumont David, 2023. Impact of far-field glacially-induced stresses on fault stability in the eastern Paris Basin, *Tectonophysics*, Vol 864, 230035, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230035>
- [122] Parizot Oriane, Missenard Yves, Vergely Pierre, Haurine Frederic, Noret Aurélie, Delpech Guillaume, Barbarand Jocelyn, Sarda Philippe, 2020. Tectonic Record of Deformation in Intraplate Domains: Case Study of Far-Field Deformation in the Grands Causses Area, France", *Geofluids*, vol. 2020, Article ID 7598137, 19 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/7598137>
- [123] Groshong R. H., Pfiffner O.A., Pringle L.K., 1984. Strain partitioning in the Helvetic thrust belt of Eastern Switzerland from the leading edge of the internal zone. *J. Struct. Geol.*, 4, 429-442.
- [124] Etchecopar, A., Vasseur, G., Daignieres, M., 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensor from fault striation analysis. *J. Struct. Geol.*, 3, 5-65.
- [125] Rocher M., Baize S., Jaillet S, Cushing M., Lozac'h Y., Lemeille F., 2003. Quaternary stresses revealed by calcite twinning inversion: Insights from observations in the Savonnières underground quarry (eastern France). *C. R. Geoscience*, 335/8, 701-708.
- [126] Lettre IRSN DG/2014-00646 du 12 novembre 2014 – Transmission de l'avis sur le potentiel géothermique de la région de Bure.
- [127] Rapport IRSN RT/PRP-DGE/2014-00067 – « Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne ». http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN-Rapport-2014-00067.pdf

- [128] Bouchot V., Bialkowski A., Lopez S., Ossi A et al., 2008. Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du bassin de Paris. Rapport final BRGM/RP-56463-FR, 92 p., 40 fig., 3 tabl., 1 ann.
- [129] Dezayes C. et al., 2007. Estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan. Rapport BRGM/RP-55729-FR, 72 p.
- [130] Bouchot V., Bonijoly D. et al., 2014. Evaluation des ressources géothermales dans le Bundsandstein et le permocarbonifère sous le site de Bure et sa région. Rapport d'expertise. Rapport BRGM 63 598 FR 50 pages 13 figures 12 tableaux 2 ann.
- [131] Michels et al., 2022, Dissolved hydrocarbon gases as tracers of solute transfer within a low maturity lithological column of eastern Paris basin, Clay Conference 2022, Nancy
- [132] Bioclim, 2000-2003. Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal - European Commission 5th Euratom Framework Programme Contract FIKW-CT-2000-00024s. <https://www.andra.fr/mini-sites/bioclim/documentation.htm>
- [133] Andra. Référentiel de site de Meuse / Haute-Marne - Tome III : l'évolution naturelle du site de Meuse / Haute-Marne - CG-TE-D-NTE-AMOA-ESE-0000-20-0017-A
- [134] Andra. Pièce 7 - VPRS - PARTIE I : contexte, périmètres, démarche et référentiels - Volume 2 - La démarche de sûreté et les référentiels associés - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V002-21-0007-A
- [135] Andra. Le programme des activités scientifiques et technologiques après le dépôt de la demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo. CG-TE-D-PRG-AMOA-AST-0000-22-0001
- [136] Wagner, T., 2021. Le Gulf Stream va-t-il sauver l'Europe du changement climatique ? Publication web 23 mars 2021, mise à jour le 26 juillet 2023. <https://bonpote.com/le-gulf-stream-va-t-il-sauver-leurope-du-changement-climatique/>
- [137] Rapport Andra CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002-A. Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - Le modèle hydrogéologique à l'actuel et son évolution sur le prochain million d'années
- [138] Rapport Andra CG-NT-FEPS-22-0009-A. Projet Cigéo – Travaux complémentaires, en vue de la DAC, du modèle hydrogéologique intégré région-secteur à l'Actuel - Rapport de la Tâche 2 - Evaluation de l'impact du rôle des failles régionales du bassin de Paris sur le modèle d'écoulement de référence du secteur de Meuse/Haute-Marne
- [139] Linard Y., Vinsot A., Vincent B., Delay J., Wechner S., De La Vaissière R., Scholz E., Garry B., Lundy M., Cruchaudet M., Dewonck S., Vigneron G., 2011. Water flow in the Oxfordian and Dogger limestone around the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. Physics and Chemistry of the Earth vol. 36, issue 17-18, pp. 1450-1468.
- [140] Brigaud B, Durllet C., Deconinck J.-F., Vincent B., Pucéat E., Thierry J., Trouiller A., 2009. Facies and climate/environmental changes recorded on a carbonate ramp: A sedimentological and geochemical approach on Middle Jurassic carbonates (Paris Basin, France). Sedimentary Geology, Vol. 222, 3–4, p. 181-206.
- [141] Modèle structural régional et local révisé - Réalisation d'une base de données structurales et d'un atlas de fiches descriptives des structures tectoniques - Andra F.RP.OGTR.14.0004
- [142] Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062
- [143] Hypothèses et valeurs paramètres retenus dans évaluations quantitatives performance et sûreté après fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0097-A

- [144] Savoye S., Goutelard F., Beaucaire C., Charles Y., Fayette A., Herbette M., Larabi Y., Coelho D., 2011. Effect of temperature on the containment properties of argillaceous rocks: The case study of Callovo–Oxfordian claystones’, *Journal of Contaminant Hydrology* 125 (2011) 102–112, (doi:10.1016/j.jconhyd.2011.05.004)
- [145] Van Loon, L.R., Muller, W., Iijima, K., 2005. Activation energies of the self-diffusion of HTO, ²²Na and ³⁶Cl in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay)’, *Appl. Geochem.* 20, pp. 961–972, 2005, (doi.org.10.1016/j.apgeochem.2004.10.007)
- [146] Rapport CEA RT DPC/SECR-04-0038 - Etude du comportement de HTO et ³⁶Cl à 4 régimes de transport (diffusion/advection) dans un échantillon d’argilite du Callovo-Oxfordien de Bure (Meuse/Haute-Marne), C.RP.PSTR.05.011
- [147] Groupement de laboratoires Transfert – Subatech - Objectif n° 4 Rôle de la variabilité minéralogique sur les propriétés de transfert de radionucléides (De, Kd), CRPFSTR1 20039
- [148] Yu C., Matray J.M., Gonçalves J., Jaeggi D., Gräsle W., Wieczorek K., Vogt T., Sykes E., 2017. Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay (Switzerland), *Swiss J Geosci.* 110, pp. 85–104, 2017, (doi.org.10.1007/s00015-016-0257-9)
- [149] Document Technique - Synthèse de l’évaluation des caractéristiques hydrauliques du Callovo-Oxfordien - CG-TE-D-NTE-AMOA-INS-0000-23-0005/A
- [150] Motellier, S., Devol-Brown, I., Savoye, S., Thoby, D., Alberto, J.C. (2007) Evaluation of tritiated water diffusion through the Toarcian clayey formation of the Tournemire experimental site (France), *Journal of Contaminant Hydrology*, 94, 99-108.
- [151] Leupin O.X., Van Loon L.R., Gimmi T., Wersin P., Soler J.M. (2017) Exploring diffusion and sorption processes at the Mont Terri rock laboratory (Switzerland): lessons learned from 20 years of field research. *Swiss J Geosci.* 110:391–403. DOI (10.1007/s00015-016-0254-z)
- [152] Distinguin, M., & Lavanchy, J. M. (2007). Determination of hydraulic properties of the Callovo-Oxfordian argillite at the bure site: Synthesis of the results obtained in deep boreholes using several in situ investigation techniques. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7), 379-392.
- [153] Delay J., Vinçot A., Krieguer J.-M., Rebours H., Armand G., 2007. Making of the underground scientific experimental programme at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, North Eastern France. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7) :2-18.
- [154] Enssle C.P., Cruchaudet M., Croisé J., 2011. Determination of the permeability of the Callovo-Oxfordian clay at the metre to decametre scale. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C* 36(17). DOI 10.1016/j.pce.2011.07.031
- [155] Gonçalves, J., Rousseau-Gueutin, P., De Marsily, G., Cosenza, P., Violette, S., 2010. What is the significance of pore pressure in a saturated shale layer? *Water Resour. Res.* 46 (2010), W04514, doi: 10.1029/2009WR008090.
- [156] Rousseau-Gueutin, P., de Greef, V., Gonçalves, J., Violette, S., Chanchole, S., 2009. Experimental device for chemical osmosis measurement on natural clay-rock samples maintained at in situ conditions. Implications for formation pressure interpretations. *J. Colloid Interface Sci.* 337, 106–116.
- [157] Gonçalves J., de Marsily G., Tremosa, J., 2012. Importance of thermo-osmosis for fluid flow and transport in clay formations hosting a nuclear waste repository. *Earth Planet. Sci. Lett.* 339–340, 1–10.
- [158] Trémosa J., Gonçalves J., Matray J.M., ‘Assessing Natural conditions for more limited osmotic abnormal fluid pressures in sedimentary basins’, *Water Resources Research.* 48 W04530. (doi.org/101029/2011WR010914), 2012

- [159] Gonçalves J., Matray J.M., Ji Yu C., 2023. Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles, *Applied Clay Science* 242, 107016, 2003, (doi.org/10.1016/j.clay.2023.107016)
- [160] Neuzil, C.E., 2015. Interpreting fluid pressure anomalies in shallow intraplate argillaceous formations. *Geophys. Res. Lett.*, 42., 4801-480
- [161] Fralova L., Lefèvre G., Madéc B., Marsac R., Thory E., Dagnelie R. V. H., 2021. Effect of organic compounds on the retention of radionuclides in clay rocks: Mechanisms and specificities of Eu(III), Th(IV), and U(VI), *Applied Geochemistry* 127, 104859, 2021
- [162] Ribet S., Maia F., Bailly C., Madé B., Grambow B., Montavon G., 2023. Temperature effect of U(VI) retention on the Callovo-Oxfordian clay rock', *Applied Clay Science* 238, 106925, 2023
- [163] Montavon G., Ribet S., Hassan Loni Y., Maia F., Bailly C., David K., Lerouge C., Madé B., Robinet J.C., Grambow B., 2023. Uranium retention in a Callovo-Oxfordian clay rock formation: From laboratory-based models to in natura conditions, *Chemosphere* 299, 13430, 2022
- [164] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Les référentiels de connaissances. Les expérimentations scientifiques et technologiques au centre de Meurtre/Haute-Marne. CG TE-D-NTE-AMOA-TR0-000-20-0002/A
- [165] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Le comportement des déchets vitrifiés (HA et MA-VL) - CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0015-A
- [166] Coolbaugh M.T. et al. 1995 Solvations of redox ions in glass-forming silicate melts', *Journal of Non-Crystalline Solids* 181 (1995) 225-230
- [167] CEA - Avis sur la spéciation du sélénium dans les verres de PF – Version simplifiée, 16 octobre 2018, MEMO SEVT CEA/DEN/MAR/DE2D/SEVT/DIR DR63
- [168] Dardenne K., González-Robles E., Rothe J., Müller N., Christill G., Lemmer D., Praetorius R., Kienzler B., Metz V., Roth G., Geckeis H., 2015. XAS and XRF investigation of an actual HAWC glass fragment obtained from the Karlsruhe vitrification plant (VEK)', *Journal of Nuclear Materials* 460 (2015) 209–215
- [169] Gossé S., Guéneau C., Bordier S., Schuller S., Laplace A., Rogez J., 2014. A Thermodynamic Approach to predict the Metallic and Oxide Phases Precipitations in Nuclear Waste Glass Melts, *Procedia Materials Science*, 7, 79-86, 2014
- [170] Rose P. B., Woodward D. I., Ojovan M. I., Hyatt N. C., Lee W. E., 2011. Crystallisation of a simulated borosilicate high-level waste glass produced on a full-scale vitrification line, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357, 2989–3001, 2011
- [171] Document technique Andra, 2013 - Evaluation du comportement de l'uranium dans les argilites du Callovo-Oxfordien- Etat naturel et systèmes perturbés - CG.NT.ASTR.1 2.0025
- [172] Andra - Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Synthèse de l'analyse des risques et incertitudes après fermeture de Cigéo, CG-TE-D-NSY-AMOA-SR2-0000-20-0013
- [173] Czömpöly O., Fábíán M., Korányi T.I., Nagy G., Horváth Z.E., Zizak I., Pollastri S., Aertsens M., Osán J. 2023. Adsorption and diffusion of selenite on Boda Claystone Formation, *Applied Clay Science*, 241, 106997, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106997>
- [174] Andra - Note conceptuelle : Le transitoire hydraulique-gaz et le devenir des radionucléides gazeux en après-fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-19-0007-A

- [175] Bérest et al., 2020. Maximum admissible pressure in salt caverns used for brine production and hydrocarbon storage, *Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Énergies nouvelles*, vol.75 p.76
- [176] Amri A., Z. Saâdi, R. Ababou, 2022. Parametric sensitivity to gas-entry pressure in two-phase flow models for a deep geologic repository of radioactive waste, *Transp. Porous Med.* 145:13–43
- [177] Saâdi Z., Contribution to model improvement for transient water-gas flow in porous media in natural and anthropogenic environments: radon gas through geosphere-buildings-atmosphere, and hydrogen gas in a geologic repository for radioactive waste, *Mémoire HDR*, 310 p., 2022
- [178] Andra - Évaluation du transitoire hydraulique-gaz en grand de Cigéo après fermeture – Synthèse du cadre des simulations numériques mises en œuvre pour la demande d’autorisation de création de Cigéo - CG-TE-D-NTE-AMOA-INS-0000-23-0003-A
- [179] Amri A., Saâdi Z., Ababou R., 2023. Modeling two-phase flow with hysteresis: comparative study of hysteresis models and application, *Rock Mech. and Rock Eng.*
- [180] Saâdi Z., Dymitrowska M., Deleruyelle F. & Marsal F., 2020. An evaluation model of the impact of hydrogen ‘piston effect’ on water displacement in a deep geological disposal of radioactive waste. *Environmental Earth Sciences* (79):1-18
- [181] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - État initial et évolution de la zone endommagée - CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-19-0005-A
- [182] Bossart P., Meier P.M., Moeri A., Trick T., Mayor J.C., 2002. Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology* 66:19 38
- [183] Tsang C-F, Bernier F, Davies C., 2005. Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal. *Int J Rock Mech Min Sci* 42, 1: 109-125.
- [184] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Tome IV du référentiel de site - Le comportement thermo-hydro-mécanique des formations géologiques - CG-TE-D-RAP-AMOA-GEO-0000-20-0009-A
- [185] Aoyagi K., Tokiwa T., Sato T., Hayano A., Fracture Characterization and Rock Mass Behavior Induced by Blasting and Mechanical Excavation of Shafts in Horonobe Underground Research Laboratory, *ISRM Rock Dynamics Summit, Okinawa, Japan, May 2019*
- [186] Tokiwa T., Tsusaka K., Aoyagi K., Fracture Characterization and Rock Mass Damage Induced by Different Excavation Methods in the Horonobe URL of Japan, *Int. J. of Civil Engineering* 16:371 381, 2018
- [187] Bossart P., Trick T., Meier P.M., Mayor J.C., Structural and hydrogeological characterisation of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland), *Applied Clay Science* 26:429 448, 2004
- [188] CETU (Centre d’Etudes des Tunnels), 1998. Dossier pilote des tunnels, Génie civil, section 4, Procédés de creusement et de soutènement
- [189] Incidence des vides dans les tunnels de stockage sur la propagation de l’EDZ à long-terme : Estimation de l’extension de la zone endommagée par une méthode géométrique hors aspects temporels. *Projet Cigéo. CG.NT.ADPG.13.0026/B.*

- [190] Andra - Modélisation du comportement mécanique d'une galerie remblayée et d'un alvéole de déchets MAVL : Approche continue et discrète – Tâche 4 – Rapport final. Rapport ITASCA 19R-008/A1. Rapport Andra CGRPFMFS200008/A.
- [191] Pièce 7 - VPRS - PARTIE II : description de l'INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture - Volume 7 - L'évolution phénoménologique du système de stockage après sa fermeture - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-V007-21-0007-A
- [192] Andra - Note conceptuelle : La charge thermique et le comportement THM du Callovo-Oxfordien autour des quartiers HA - CG-TE-D-NTE-AMOA-GE0-0000-19-0007-A
- [193] Document technique Andra - Centre de Meuse/Haute-Marne - Expérimentation CRQ en GCS. Analyse des résultats - D.RP.AMFS.22.0148
- [194] Lalan P., Dauzères A., De Windt L., Bartier D., Sammaljärvi J., Barnichon J-D, Techer I., Detilleux V., 2016. Impact of a 70 °C temperature on an ordinary Portland cement paste/claystone interface: An in situ experiment, *Cem. Concr. Res.* 83 (2016) 164–178. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.001>.
- [195] Barakat Y., Mokni N., Cui Y-Ji, Delage P., Bernier F., 2023, Investigation of the self-sealing of Opalinus Clay from the lower sandy facies of Mont Terri site by mock-up tests with highly saline and alkaline solutions, *Can. Geotech. J.* (2023). <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0615>.
- [196] Techer I., Bartier D., Boulvais Ph., Tinseau E., Suchorski K., Cabrera J., Dauzères A., 2012, Tracing interactions between natural argillites and hyper-alkaline fluids from engineered cement paste and concrete: Chemical and isotopic monitoring of a 15-years old deep-disposal analogue, *Appl. Geochem.* 27 (2012) 1384–1402. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.08.013>.
- [197] Bartier D., Techer I., Dauzères A., Boulvais P., Blanc-Valleron M.-M., Cabrera J., 2013, In situ investigations and reactive transport modelling of cement paste/argillite interactions in a saturated context and outside an excavated disturbed zone, *Appl. Geochem.* 31 (2013) 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.12.009>.
- [198] Altmann, S., Aertsens, M., Appelo, T., Bruggeman, C., Gaboreau, S., Glaus, M., Jacquier, P., Kupcik, T., Maes, N., Montoya, V., Rabung, T., Robinet, J.-C., Savoye, S., Schäfer, T., Tournassat, C., van Laer, L., van Loon, L., 2015. Processes of cation migration in clayrocks: Final Scientific Report of the CatClay European Project. Commissariat à l'énergie atomique (CEA) (2015). N°CEA-R-6410. 145 p. Disponible à l'adresse : <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-01223753/document>.
- [199] Dagnelie R.V.H., Arnoux P., Eaux J., Radwan J., Nerfie P., et al, 2017. Perturbation induced by a nitrate plume on diffusion of solutes in a large-scale clay rock sample. *Applied Clay Science*, 2017, 141, pp.219-226. [ff10.1016/j.clay.2017.02.025](https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.025) ff hal-04240790f.
- [200] Rapport IRSN n°2017-00004 - Reprise et conditionnement des silos STE2 de l'établissement AREVA NC La Hague - Spécifications de production du colis C5 et acceptabilité en stockage géologique.
- [201] Note technique Andra - Influence du fluage à long terme des argillites sur les écoulements d'eau dans les ouvrages - CG.NT.AEAP.19.0029.
- [202] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo Les référentiels de connaissances - Les matériaux argileux remaniés - CG-TE-D-RAP-AMOA-GE0-0000-20-0004/A
- [203] Zhang, C.L., 2017.- Sealing Performance of Fractured Claystone and Clay-Based Materials within the Framework of the German Project THM-TOM and the EC Project DOPAS (Final Report). *Gesellschaft für anlagen-und reaktorsicherheit*. N°GRS-451, 237p.

- [204] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Le comportement des déchets MA-VL - CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0016-A
- [205] Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les notes conceptuelles - Les modèles de relâchement phénoménologiques des radionucléides pour les différentes familles de colis des combustibles usés en fonction des conditions d'environnement - CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0011-A
- [206] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Les déchets « Graphite » - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-20-0026-A
- [207] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo- Les notes conceptuelles - Les modèles de relâchement phénoménologiques des radionucléides des colis de déchets HA et MA-VL en fonction des conditions d'environnement : synthèse des connaissances - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0033-A
- [208] Andra - Les notes conceptuelles - Les modèles de relâchement phénoménologiques des radionucléides pour les différentes familles de colis de déchets HA et MA-VL en fonction des conditions d'environnement : synthèse de connaissances - CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-20-0020-A
- [209] Guo X., Gin S., Lei P., Yao T., Liu H., Schreiber D. K., Ngo D., Viswanathan G., Li T., Kim S. H., Vienna J. D., Ryan J. V., Du J., Lian J., Frankel G. S., 2020. Self-accelerated corrosion of nuclear waste forms at material interfaces. *Nature Materials* 19, 310–316
- [210] Guo X., Gin S., Liu H., Ngo D., Luo J., Kim S. H., Mohanty C., Vienna J. D., Ryan J. V. and Frankel G. S., 2020. Near-field corrosion interactions between glass and corrosion resistant alloys. *Materials Degradation*
- [211] Guo X., Gin S. and Frankel G. S., 2020. Review of corrosion interactions between different materials relevant to disposal of high-level nuclear waste. *Materials Degradation*
- [212] Mohanty C., Guo X., Kaya H., Gin S., Yang K., Zhang Z., Kim S. H., Lian J., Wang J. and Frankel G. S., 2022. Long-term interactive corrosion between International Simple Glass and stainless steel. *Materials degradation*
- [213] Shoesmith D., Zagidulin D., 2011. The corrosion of zirconium under deep geologic repository conditions. *Journal of nuclear materials*. Vol. 418, N°1-3, p.292–306
- [214] Tecdoc AIEA n°1343, 2003. Spent fuel performance assessment and research. ISBN 92–0–102703–6. ISSN 1011–4289. 132 p.
- [215] Buhn, L., Hansson, N., Ekberg, C., Fors, P., Delville, R., Spahiu, K., The interaction of molecular hydrogen with α -radiolytic oxidants on a (U,Pu)O₂ surface, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 505, 2018, ISSN 0022-3115, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.04.006>
- [216] Kerleguer, V., Jégou, C., De Windt, L., Broudic, V., Jouan, G., Miro, S., Tocino, F., Martin, C., The mechanisms of alteration of a homogeneous U_{0.73}Pu_{0.27}O₂ MOx fuel under alpha radiolysis of water, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 529, 2020, ISSN 0022-3115, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151920>
- [217] Jegou, C., Odorowski, M., Kerleguer, V., Broudic, V., Schlegel, M.L., Jouan, G., Marques, C., De Windt, L., MOX Fuel corrosion processes under waste disposal conditions, *Corrosion Science*, Volume 195, 2022, ISSN 0010-938X, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109964>
- [218] Odorowski, M., Jégou, C., De Windt, L., Broudic, V., Peugeot, S., Magnin, M., Tribet, M., Martin, C., Oxidative dissolution of unirradiated Mimas MOX fuel (U/Pu oxides) in carbonated water under oxid

- and anoxic conditions, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 468, 2016, ISSN 0022-3115, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.09.059>
- [219] Martinez Esparza, A., Cunado, M.A., Gago, J.A., Quinones, J., Iglesias, E., Cobos, J., Gonzalez de la Huebra, A., Cera, E., Merino, J., Bruno, J., Pablos, J. de, Casas, I., Clarens, F., Gimenez, J., Development of a Matrix Alteration Model (MAM), 2005. Empresa Nacional de Residuos, S.A., ENRESA. Madrid (Spain)
- [220] Grambow B., 2008. Final report on radiolytic dissolution model. ARMINES, France. Deliverable D-N: 1.5.14, NF-PRO, European Commission 2008
- [221] Nielsen F., Ekeroth E., Eriksen T. E., Jonsson M. Simulation of radiation induced dissolution of spent nuclear fuel using the steady-state approach. A comparison to experimental data, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 374, 2008, ISSN 0022-3115, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.08.009>
- [222] Quiñones J., Wegen D., Martin C., Bruno J., Rodriguez Villagra N., Smidt O., Watson C., Schumacher S., Wasselin-Trupin V., Tamayo A., Iglesias E., De Pablo J., Nieto J., Serres C., Robinson P., Johnson L., Ferry C., Duro L., Mathieu G., Jonsson M., Casas I., Loida A., Kienzler B., Grambow B., Jegou C., Merino J., Liu J., Lemmens K., Pellegrini D., Metz V., Martínez-Esparza A., Ekeroth E., Pepin G., Hodgkinson D., Bracke G., Spahiu K., 2010. European Commission, MICADO – Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in nuclear waste repository, Publications Office, <https://doi.org/10.2777/25846>
- [223] Andra - Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo - Les référentiels de connaissances - Les matériaux cimentaires - CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0013-A
- [224] Drouet E., 2010. Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires : prise en compte des transferts hydriques, Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure de Paris Cachan.
- [225] Kangni-Foli E., Poyet S., Le Bescop P., Charpentier T., Bernachy-Barbé F., Dauzères A., L'Hôpital E., d'Espinose de Lacaillerie J.-B., Carbonation of model cement pastes: The mineralogical origin of microstructural changes and shrinkage, *Cement and Concrete Research*, Volume 144, 2021, 106446, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106446>.
- [226] Dauzères A., Le Bescop P., Cau-Dit-Coumes C., Brunet F., Bourbon X., Timonen J., Voutilainen M., Chomat L., Sardini P. On the physico-chemical evolution of low-pH and CEM I cement pastes interacting with Callovo-Oxfordian pore water under its in situ CO₂ partial pressure, *Cement and Concrete Research*, Volume 58, 2014, Pages 76-88, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.010>.
- [227] Dauzères A., G. Achiedo, D. Nied, E. Bernard, S. Alahrache, B. Lothenbach, Magnesium perturbation in low-pH concretes placed in clayey environment—solid characterizations and modeling, *Cement and Concrete Research*, Volume 79, 2016, Pages 137-150, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.002>.
- [228] Neji M., A. Dauzères, A. Grellier, J. Sammaljärvi, O. Tikkanen, M. Siitari-Kauppi, Comparison of the chemo-mechanical behavior of low-pH cement exposed to calcareous water and to argillite pore water, *Applied Geochemistry*, Volume 144, 2022, 105392, ISSN 0883-2927, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105392>.
- [229] Bernard E., Lothenbach B., Rentsch D., Pochard I., Dauzères A., 2017. Formation of magnesium silicate hydrates (M-S-H), *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 99, 2017, Pages 142-157, ISSN 1474-7065, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.005>.
- [230] Bernard E., Lothenbach B., Chlique C., Wyrzykowski M., Dauzères A., Pochard I., Cau-Dit-Coumes C., 2019. Characterization of magnesium silicate hydrate (M-S-H), *Cement and Concrete Research*,

Volume 116, 2019, Pages 309-330, ISSN 0008-8846,
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.007>.

- [231] Dewitte C., Bertron A., Neji M., Lacarrière L., Dauzères A., 2022. Chemical and Microstructural Properties of Designed Cohesive M-S-H Pastes. *Materials* 15, 547.
- [232] Andra - Référentiels de connaissances scientifiques : La corrosion des matériaux métalliques - CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-20-0012-A
- [233] Bulidon N., 2019. L'activité bactérienne et évolution phénoménologique du stockage dans le temps (après fermeture) - CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-19-0008/A
- [234] Wittebroodt C., Goethals J., De Windt L., Fabian M., Miron G. D., Zajec B., Detilleux V. (Accepted for publication/Under review/2024). Final technical report on the steel/cement material interactions. Deliverable D2.9 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.
- [235] Goethals J. *et al.*, 2023. "Interaction between carbon steel and low-pH bentonitic cement grout in anoxic, high temperature (80 °C) and spatially heterogeneous conditions," *Corros. Sci.*, vol. 211, no. August 2022, p. 110852, doi: 10.1016/j.corsci.2022.110852.
- [236] Robineau M., Deydier V., Crusset D., Bellefleur A., Neff D., Vega E., Sabot R., Jeannin M., Refait P., 2021. Formation of iron sulfides on carbon steel in a specific cement grout designed for radioactive waste repository and associated corrosion mechanisms, *Materials (Basel)*. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14133563>.
- [237] Andra - Note conceptuelle - L'activité bactérienne et l'évolution phénoménologique du stockage dans le temps - CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-19-0008-A
- [238] Diler E., Leblanc V., Gueuné H., Maillot V., Linard Y., Charrier G., Crusset D. 2023. Potential influence of microorganisms on the corrosion of the carbon steel in the French high-level long-lived nuclear waste disposal context at 50°C. *Materials and Corrosion*, 1-18.
- [239] Giannakandropoulou L. et al., 2023. "Impact of γ -radiation on carbon steel anaerobic corrosion and H₂ production", *Radiation Physics and Chemistry* 206 (2023) 110742.
- [240] Robineau M. 2023. "Active/passive zones on carbon steel in contact with argillites fragment and specific cement grout designed for radioactive waste repository". Poster at EuroCorr2023.
- [241] Mokni N., Cabrera J., Deleruyelle F., On the installation of an in situ large-scale vertical SEALing (VSEAL) experiment on bentonite pellet-powder mixture, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023
- [242] Mokni N., Cabrera J., Deleruyelle F., Large scale Vertical SEALing (VSEAL) test: Impact of gas migration on bentonite based vertical seals, 8th International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2023)
- [243] Mokni N., Barnichon J. D., Dick P., Son N. T, Effect of technological macro voids on the performance of compacted bentonite/sand seals for deep geological repositories, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 88:87–97, 2016
- [244] Guerra A. M., Cui Y. J., Mokni N., Delage P., Bornert M., Aïmedieu P., Tanga A. M., Bernier F., 2018. Investigation of the hydro-mechanical behaviour of a pellet/powder MX80 bentonite mixture using an infiltration column. *Engineering Geology*, 243, 18-25

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31 av. de la division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER
B.P 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses

TÉLÉPHONE
+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET
www.irsn.fr

MEMBRE DE
ETSON