

RAPPORT FINAL

**EVALUATION DE CERTAINS ASPECTS DE LA DEMANDE
D'AUTORISATION DE CRÉATION (DAC) DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE
DE BASE (INB) CIGÉO**

Préparé pour

Le Comité Local d'Information et de Suivi

Par l'Équipe de l'IEER : Jaak Daemen, Ph.D., Arjun Makhijani, Ph.D., et Sophie Violette, Ph.D.

avec George Danko, Ph.D.

Traduction : Annie Makhijani

2025-11-25

Contents

Remerciements	4
I. Principales recommandations	5
II. Evaluation par l'IEER des réponses apportées par l'ANDRA sur les recommandations faites par l'IEER dans son rapport de 2011	7
III. Introduction	15
IV. Le terme source	17
1. Classification des déchets	17
2. Les deux scénarios de base pour les termes sources	18
3. Commentaires sur les inventaires de référence de réserve	21
4. Définition d'un terme source dans le contexte de l'incertitude de la politique énergétique	22
5. Matières radioactives actuellement non classées comme déchets	31
6. Commentaires sur les préoccupations relatives au terme source de l'IEER 2011	36
7. Conclusions et recommandations concernant le terme source	37
8. Références.....	38
V. Evaluation des modélisations hydrogéologiques conduites par l'ANDRA, y compris le choix des modèles conceptuels, des paramètres, des conditions aux limites et des scénarii	41
1. Modèle régional hydrogéologique	45
2. Modèle de secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois.....	51
3. Modèles d'écoulement région-secteur Meuse Haute-Marne, dits « de référence » & « de prédiction »	56
4. Modèle d'évolution hydrogéologique sur le prochain million d'années	61
5. Modalités de transfert des radionucléides.....	67
6. Recommandations.....	68
7. Références (Documents consultés ou cités)	69
VI. Évaluation des propositions de recherche pendant la Phase Industrielle Pilote (Phipil)	73
1. Objectifs et description de la Phipil.....	73
2. Déchets à stocker dans la zone du projet Phipil.....	75
3. Evaluation du programme de recherche pendant la Phipil	78
4. Le changement climatique et la Phipil	86
5. Conclusions et recommandations	88
a. Points forts	88

b. Problèmes et lacunes.....	89
c. Recommandations.....	90
6. Références	92
VII : Essais thermiques menés pendant la phase pilote pour définir la conception de la phase industrielle	94
1. Méthode proposée.....	96
2. Recommandations.....	99
3. Références	99

Remerciements

Nous apprécions la confiance que le CLIS a accordée à l'Institut de recherche sur l'énergie et l'environnement (IEER) pour évaluer certains aspects de la demande d'autorisation et de création d'une installation nucléaire de base (INB) Cigéo (acronyme : DAC). Il ne s'agit pas d'un examen exhaustif de la DAC, mais plutôt, à la demande du CLIS, d'un examen centré sur les thèmes des chapitres IV (terme source), V (hydrogéologie) et VI (phase industrielle pilote). Le rapport devrait être lu en tenant compte de ce fait.

Nous remercions le CLIS et son secrétaire général, Benoît Jacquet, pour leur rôle de coordination tout au long du projet, notamment pour avoir facilité la communication avec l'Andra et les réunions avec le CLIS.

L'Andra nous a transmis les documents importants que nous avions demandés, ainsi que des commentaires détaillés sur une version préliminaire du présent rapport. Les membres du CLIS ont également apporté des commentaires substantiels. En outre, le Professeur Alain Dassargues de l'Université de Liège a fourni une évaluation indépendante, notamment du chapitre sur l'hydrogéologie. À la demande du CLIS, l'IEER a également demandé au Dr George Danko de rédiger un court chapitre sur les essais thermiques, hydrauliques et mécaniques qui pourraient être utiles à mener pendant la phase industrielle pilote du projet. Il s'agit du chapitre VII du rapport.

L'équipe de l'IEER a pris soigneusement en compte les commentaires de toutes les parties. Ceux-ci ont contribué à améliorer le rapport. Cependant, les auteurs sont seuls responsables du contenu de ce rapport final, y compris de l'analyse qu'il contient ainsi que de ses conclusions et recommandations. Les chapitres thématiques – chapitres IV, V, VI et VII – traitent de sujets spécialisés ; leurs auteurs sont identifiés en tête de chaque chapitre.

Nous espérons sincèrement que ce rapport sera utile au CLIS, à l'Andra, aux habitants de la région Meuse-Haute Marne, ainsi qu'aux décideurs politiques français et au grand public en général pour prendre des décisions sur un sujet difficile et complexe qui aura un impact sur de nombreuses générations à venir.

Arjun Makhijani, Ph.D., Directeur de projet et président de l'IEER

Jaak Daemen, Ph.D., Professeur émérite, Université du Nevada, Reno.

Sophie Violette, Ph.D., Maître de Conférences HDR, Sorbonne Université & École Normale Supérieure-Paris Sciences et Lettres

George L. Danko, Ph.D., D.Sc. (Acad.Sci), Professor, Mackay School of Earth Science and Engineering, University of Nevada, Reno

Annie Makhijani, scientifique de projet, IEER et traductrice pour ce projet

(Affiliation institutionnelle autre que l'IEER à titre indicatif uniquement)

I. Principales recommandations

1. L'Andra devrait réviser la DAC en profondeur et la republier pour la soumettre à la considération du public après une évaluation indépendante. La DAC contient un certain nombre de points forts, Néanmoins il existe des lacunes importantes et certains modèles hydrogéologiques sont inappropriés. De plus le modèle hydrogéologique régional du bassin de Paris est établi à partir d'hypothèses scientifiquement infondées et le modèle du secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois n'est pas en mesure de reproduire les observations. L'Andra a souligné que ce dernier n'a pas été en mesure de répondre aux attentes et ne répond pas aux objectifs fixés. L'Andra nous a assuré qu'un nouveau modèle capable de reproduire le comportement hydrodynamique karstique des calcaires du Barrois sera développé. De plus, la DAC ne présente pas de terme source définitif (voir la recommandation 2 ci-dessous). L'actuelle DAC présente des résultats, mais souvent ne fournit pas les analyses sous-jacentes, ce qui revient à demander au public de croire l'Andra sur parole. Il est impossible de vérifier des conclusions clés auxquelles l'Andra est parvenue. De plus, l'Andra ne semble pas avoir soumis son analyse à une évaluation indépendante, malgré la recommandation faite par l'IEER en 2011. Il est essentiel que les déclarations de l'Andra concernant les résultats et les conclusions soient référencées dans les documents contenant les analyses sous-jacentes. Les documents de référence doivent être clairement indiqués et facilement accessibles au public. Toutes les sources des tableaux, figures et conclusions doivent être clairement indiquées. Ces procédures devraient également être suivies pour les documents ultérieurs.

2. L'Andra devrait préparer deux variantes d'un terme source définitif : comme le recommande le rapport 2011 de l'IEER, un *terme source définitif* est essentiel ; il fait toujours défaut. Il est nécessaire pour plusieurs raisons, notamment pour évaluer la capacité du Cigéo et pour effectuer des évaluations réalistes des performances correspondant à la politique énergétique actuelle. Par exemple, l'inventaire de référence présuppose que tout le plutonium déjà séparé ou encore présent dans le combustible utilisé, y compris le combustible utilisé MOX sera utilisé comme combustible nucléaire. Cependant les déchets issus de certaines installations qui seront nécessaires pour cette utilisation ne figurent pas dans cet inventaire. L'inventaire de réserve établi pour tenir compte des évolutions possibles entre l'inventaire de référence et les « déchets qui seront réellement stockés dans l'INB Cigéo » (voir le chapitre IV) ne reflète plus la politique nucléaire énergétique actuelle. Un terme source définitif est par conséquent nécessaire. Il devrait être décliné en deux variantes. La première devrait intégrer l'utilisation complète du plutonium sous forme de combustible MOX, avec un terme source réaliste pour l'américium 241 lequel nécessiterait d'être stocké dans le site. Elle devrait inclure les déchets HA et MA-VL générés par tous les réacteurs et les installations de retraitement nécessaires à cette fin. La seconde devrait inclure le stockage d'une certaine quantité de combustible utilisé, y compris le combustible MOX utilisé et une partie du plutonium séparé inutilisé.

3. La modélisation de l'évaluation des performances dans la DAC révisée devrait être fondée sur le terme source définitif : elle devrait être effectuée pour les deux versions du terme source définitif (voir le chapitre IV).

4. L'Andra devrait estimer la capacité du site en matière de stockage des déchets radioactifs : il est généralement admis que la capacité du site est limitée. La superficie initialement étudiée en 2005 était de 250 km². Sur cette superficie, 100 km² ont été sélectionnés pour une caractérisation plus détaillée en 2009. Une ZIRA plus petite, de 30 km², représentant la projection en surface de la « zone d'implantation des ouvrages souterrains » (ZIOS), a également été définie. La ZIRA reflète l'accord conclu avec les parties prenantes régionales. L'ANDRA devrait estimer la limite du terme source pouvant être stocké dans le site, et si, et dans quelles conditions, sa projection en surface pourrait s'étendre au-delà de la ZIRA. Il se pose aussi la question de la capacité maximale du site, en tenant compte des réalités techniques et des accords conclus avec les parties prenantes.

5. L'Andra devrait revoir sa modélisation hydrogéologique en utilisant des paramètres plus réalistes et plus restrictifs : les paramètres utilisés dans l'actuelle DAC sont trop optimistes. En conséquence, la modélisation hydrogéologique présentée par l'Andra indique des performances satisfaisantes après la fermeture du site sur une période d'un million d'années. Il est possible que des paramètres plus réalistes et plus restrictifs révèlent une défaillance des performances dans un délai beaucoup plus court. En outre, l'ANDRA ne devrait pas omettre des données au motif que leurs valeurs pourraient être atypiques, comme elle l'a fait dans le cas de la fracturation ; des valeurs extrêmement élevées ou basses pourraient refléter les conditions réelles de la roche hôte. L'Andra doit également tenir compte de manière explicite de l'impact de l'irréversibilité d'une partie de l'endommagement créé dans l'EDZ.

6. Des changements climatiques importants, notamment l'arrêt éventuel de la circulation thermohaline transatlantique (AMOC), doivent être pris en compte pendant la période d'exploitation de Cigéo. La période d'exploitation du site de stockage est très longue. Le risque de points de basculement, tels que l'arrêt de l'AMOC, pendant cette période est réel. De tels changements pourraient compromettre sérieusement le fonctionnement du site de stockage et sa capacité à stocker les déchets de manière récupérable. Bien que l'Andra ait considéré les effets du changement climatique, elle n'a pas pris en compte l'ampleur des perturbations climatiques graves qu'un arrêt de l'AMOC au cours de la période d'exploitation pourrait déclencher. Il est essentiel qu'elle le fasse dans la DAC révisée.

7. L'Andra devrait réaliser des travaux spécifiques sur site dans la ZIOS à différentes profondeurs de manière à transposer correctement les données du laboratoire souterrain à la ZIOS. Ces travaux concernent la transposition des données relatives à la fracturation, à la cicatrisation des fractures, aux changements irréversibles de la taille des pores dans l'(EDZ) et au fluage. Ces travaux doivent être achevés pendant la phase industrielle pilote.

8. L'Andra devrait réaliser des essais conçus pour la transposition fiable des données des essais thermiques menés dans le laboratoire souterrain à la ZIOS. Les essais que nous recommandons sont décrits dans le chapitre VII.

II. Evaluation par l'IEER des réponses apportées par l'ANDRA sur les recommandations faites par l'IEER dans son rapport de 2011

Recommandations formulées dans le rapport IEER 2011 – Evaluation IEER 2025

1. Evaluation externe : L'Andra a fait beaucoup de bons, et dans de nombreux cas d'excellents travaux scientifiques. Toutefois, ses évaluations des performances ont tendance à être systématiquement optimistes et ne reflètent pas pleinement les détails des données disponibles. Au cours de cet examen, nous n'avons pas pu déterminer certains éléments essentiels des travaux scientifiques que l'Andra a faits, mais il semble que certaines données ont été omises ou minimisées dans les évaluations des performances. Pour éviter de telles évaluations optimistes, un niveau important d'évaluations supplémentaires indépendantes externes, allant bien au-delà des évaluations externes actuelles doit se poursuivre. Ces examens devraient coïncider avec la recherche, et continuer tout au long de toutes les phases, y compris après le démarrage de l'exploitation du site de stockage, si celui-ci reçoit l'autorisation. L'examen pourrait être fait par l'IRSN, mais il lui faudrait le personnel qualifié dans les spécialisations requises et suffisamment de financement. Il est nécessaire de mener un examen indépendant et de bien évaluer tous les aspects des travaux scientifiques volumineux de l'Andra et comment ils sont incorporés dans ses évaluations des performances et de sûreté.

IEER Commentaire 2025 : pour autant que nous puissions en juger cette recommandation reste d'actualité pour les travaux conduits par l'Andra depuis 2011.

Même les commentaires fournis de manière indépendante sont ignorés. Par exemple, plusieurs réponses que nous avons reçues sont de nature générale. Elles n'adressent pas la partie essentielle des commentaires qui insiste sur la nécessité d'intégrer les commentaires dans la littérature scientifique. Nous citons, à titre d'illustration, certaines des réponses et commentaires formulés par l'Andra sur le rapport préliminaire de l'IEER du 30 avril 2025 :

1. Le rapport préliminaire de l'IEER soulignait la nécessité de prendre en compte l'impact du changement climatique dans le bassin parisien (« bassin de Paris »), y compris l'impact de l'évolution des régimes pluviométriques (p. 27 du rapport préliminaire de l'IEER ; point 3 de la réponse de l'Andra au chapitre V sur l'hydrogéologie). L'Andra a rejeté la nécessité de prendre en compte le changement climatique dans ce contexte, malgré la réalité d'une augmentation importante de la température (+1,3 °C à +1,5 °C) qui s'est déjà produite. L'ANDRA a déclaré :
 - a. « Le développement du modèle hydrogéologique du bassin parisien n'avait pas pour objectif d'évaluer l'impact du changement climatique sur les écoulements dans les formations aquifères mais bien l'identification d'un état hydrogéologique à l'actuel (qui correspond aux premières phases du développement du modèle dans les années 2000) pour fournir des conditions aux limites cohérentes à l'échelle du bassin de Paris en particulier dans les formations d'intérêts pour les modélisations hydrogéologiques du projet Cigéo (Barrois, Kimméridgien, Oxfordien, COX, Dogger). »

L'IEER fait remarquer que, bien que l'objectif initial ne semble pas inclure l'impact du changement climatique sur les flux vers les aquifères (ce qui constitue en soi un problème important), une réponse scientifiquement fondée de l'Andra, nécessaire à l'évaluation des

performances, aurait été d'accepter la suggestion de l'IEER de prendre en compte l'impact du changement climatique sur le bassin parisien.

2. Le rapport préliminaire de l'IEER indiquait que la prise en compte de l'impact de la construction du Laboratoire souterrain sur la dynamique des aquifères permettrait une validation plus rigoureuse des modèles (p. 29). Au lieu d'opter pour une validation plus rigoureuse des modèles (ou d'expliquer pourquoi la suggestion de l'IEER ne serait pas utile), l'ANDRA a fourni une réponse bureaucratique :
 - a. « Ce genre de détails techniques n'est pas l'objet des documents de la DAC qui répondent à un niveau de détail en lien avec la réglementation. »

L'IEER estime que même si cela n'est pas strictement requis par la réglementation, il convient de procéder à la validation la plus rigoureuse possible du modèle hydrogéologique à partir des données disponibles. En effet, compte tenu de la complexité et de la difficulté d'estimer les performances sur des périodes extrêmement longues, tous les moyens raisonnables de validation du modèle hydrogéologique doivent être utilisés afin de minimiser les erreurs d'estimation.

3. L'approche de l'Andra en matière d'études indépendantes tend à être isolée, même dans les cas où elle prétend ne pas l'être. En ce qui concerne l'utilisation des données piézométriques pour la calibration, l'Andra avait déclaré : « La calibration ainsi obtenue est en concordance avec toutes les études antérieures menées sur le Bassin parisien. » Dans son rapport préliminaire, l'IEER avait demandé des références spécifiques à ces études (p. 29). En réponse, l'Andra a déclaré qu'elle n'utilisait que ses propres études : « Il est question des études antérieures menées par l'Andra sur le Bassin parisien. Ce modèle (bilans hydrologiques, données calibrées, etc.) n'a pas été comparé aux travaux disponibles dans la littérature scientifique. »

La déclaration de l'Andra dans la DAC n'est pas correcte : en effet, L'Andra n'a pas fait la calibration « avec toutes les études antérieures menées sur le Bassin parisien. » De plus, l'Andra ne s'est pas sérieusement engagée à utiliser des études scientifiques indépendantes pour la calibration, bien que l'IEER lui ait fourni des références pertinentes sur la question. Il ne s'agit pas seulement d'une question théorique. La question concerne l'utilisation des données disponibles pour la calibration des modèles numériques. Comme indiqué dans le chapitre sur l'hydrogéologie, l'approche de l'Andra continue de donner lieu à des projections de performance trop optimistes.

2. Redondance : Les évaluations des performances de l'Andra font l'hypothèse que le milieu géologique suffira par lui-même à satisfaire les critères de performance radiologique sur le long terme. Toutefois, comme on l'a souligné plus haut, les évaluations de l'Andra sont optimistes. Une évaluation probabiliste utilisant toute la gamme des paramètres donne un éventail beaucoup plus large de résultats comparé à ceux obtenus par l'Andra à partir d'une analyse limitée de sensibilité. De plus, beaucoup de recherches restent encore à faire. En outre, le terme source n'est pas encore précisément défini. La combinaison de ces facteurs aboutit à de grandes incertitudes dans l'évaluation des performances qui indiquent la nécessité pour l'Andra d'envisager d'autres modèles conceptuels y compris avec des conteneurs de déchets beaucoup plus durables qui seraient conçus pour jouer un rôle dans la limitation du terme source

au-delà des barrières ouvragées. Actuellement, l'Andra suppose que les caractéristiques géologiques de la roche hôte seront suffisantes à elles seules pour garantir des performances satisfaisantes sur des périodes très longues. Une approche dans laquelle les barrières ouvragées fourniraient une capacité redondante d'isolement pour la performance permettrait également de réduire les incertitudes pour s'assurer que les objectifs de performance peuvent être satisfaits. Elle est donc aussi souhaitable de ce point de vue. Dans son rapport de 2005 l'IEER avait déjà recommandé une manière d'aborder la conception qui intégrait une telle redondance.

IEER 2025 : la redondance des capacités de confinement de la barrière ouvragée d'une part et de la couche géologique d'autre part nous apparaît être une garantie nécessaire en termes de sûreté. En effet, la complexité de chaque système étudié (couche hôte & barrières ouvragées) et leurs hétérogénéités propres ne permet pas avec les moyens numériques actuels d'investiguer toute la gamme des possibles en termes de processus couplés et de transfert des radionucléides vers la biosphère. Dans la DAC l'Andra présente l'ensemble des travaux réalisés sur chacun des systèmes et répond ainsi à la recommandation formulée par l'IEER en 2011.

3. Terme source : Les quantités et les types de déchets qui seront mis en stockage doivent être définitivement précisés le plus rapidement possible. Les incertitudes autour de la question de l'élimination du combustible usé et sur les quantités finales de produits de fission et d'actinides, dont les radionucléides transuraniens, pourraient entraîner de graves problèmes techniques à l'avenir. Par exemple, l'Andra ne se prépare pas activement pour l'élimination du combustible usé, bien que les conditions requises de sa mise en stockage soient beaucoup plus complexes et difficiles du point de vue minier et de la stabilité.

IEER 2025 : L'absence d'un terme source définitif continue de poser problème. L'inventaire de référence repose sur un programme d'énergie nucléaire qui est déjà obsolète. Il est bien sûr essentiel de fixer un terme source particulier afin de dimensionner le site et d'évaluer ses performances. Cependant, celui-ci doit être aussi actualisé et complet que possible. Ce n'est pas le cas de l'inventaire de référence. Il est incomplet, même selon ses propres critères. Plus précisément, il part du principe que tous les combustibles usés, y compris les combustibles MOX, seront retraités et que le plutonium sera entièrement utilisé. Or, toutes les installations nécessaires à l'utilisation du plutonium n'ont pas été prises en compte. La description de l'inventaire de référence par l'Andra (Andra 2022, Pièce 7, Partie II, Vol 3, p. 11) exclut explicitement les réacteurs nécessaires à l'utilisation des matières nucléaires actuellement non incluses dans l'inventaire et pouvant être consommées :

« il [c.-à-d. : le scénario industriel d'exploitation des installations nucléaires retenu] considère que les matières (uranium et plutonium) non valorisées dans les réacteurs REP du parc actuel et l'EPR de Flamanville pourront l'être dans des installations futures. Les déchets produits par un éventuel futur parc de réacteurs ne sont pas pris en compte. »

Cette omission est surprenante pour plusieurs raisons. La composition isotopique du plutonium séparé du combustible MOX usé serait fortement dégradée. Le MOX usé contient des concentrations plus élevées d'isotopes de plutonium supérieurs au Pu 239, notamment du Pu 240 et du Pu 241, que le plutonium séparé du combustible usé à base d'oxyde d'uranium. Le plutonium dérivé du MOX sera difficile ou impossible, à utiliser dans les réacteurs à eau légère. L'inventaire de référence est incomplet car il n'inclut pas toutes les installations et tous les réacteurs nécessaires pour répondre à l'hypothèse

selon laquelle tout le plutonium sera consommé, c'est-à-dire qu'aucun plutonium séparé ne sera stocké dans le Cigéo.

L'inventaire de référence est également incomplet car il omet l'américium 241 qui devra être séparé du plutonium issu de retraitement qui a été stocké pendant de nombreuses années avant de pouvoir être transformé en combustible MOX. Dans ses commentaires sur le rapport préliminaire de l'IEER, l'Andra a affirmé que « La composition isotopique du plutonium séparé (dont la teneur en américium 241) sera prise en compte dans le cadre de l'étude qui sera menée en réponse à l'engagement 2024-E1. » Mais cette réponse ne donne aucune assurance que le stockage de l'américium séparé sera pris en compte dans l'inventaire de référence. En tout état de cause, l'IEER affirme que l'inventaire de référence est incomplet à cet égard, entre autres.

Notons aussi que l'inventaire de réserve, qui devrait démontrer l'adaptabilité du site à accommoder une politique énergétique au-delà du volume maximal de l'inventaire de référence, ne tient pas compte de la totalité des réacteurs prévus (même s'ils ne sont pas tous autorisés). (Voir le chapitre IV.)

4. Évaluation de la performance : L'Andra doit effectuer une évaluation de la performance probabiliste en utilisant les fourchettes complètes des valeurs des paramètres. L'Andra doit mieux prendre en compte les questions de l'hétérogénéité, le potentiel de transport convectif et diffusif dans les voies d'écoulement verticales. Les circonstances qui créent la possibilité d'un non-respect des critères de dose doivent être identifiées et prises en compte dans les mesures de conception, par exemple la réduction du terme source dans le champ lointain. Ces mesures doivent être évaluées du point de vue de leur capacité à résoudre le problème, s'il venait à se produire.

IEER 2025 : la lecture de la DAC ne permet pas d'évaluer si ce point a été réalisé par l'Andra à chacune des étapes de modélisation ou d'évaluation quantitative de l'impact de Cigéo ou de ses performances en termes de capacité de rétention des radionucléides. En effet, les analyses de sensibilité des paramètres des modèles ne sont pas présentées, ni même évoquées. Aussi, les résultats semblent pour certains relativement optimistes pour faire la démonstration de sûreté. Voir le chapitre V (hydrogéologie) pour plus de détails.

Un exemple particulièrement frappant est l'exclusion par l'ANDRA des valeurs de fracturation extrême (ANDRA Socle 2022, p. 481 et Figure 3-66) :

« Les données de fracturation autour des galeries du Laboratoire de recherche souterrain sont synthétisées sur la figure 3-66 en utilisant des diagrammes de Tukey. Le choix est fait de représenter pour les extrémités des moustaches, non pas les valeurs extrêmes mais la plus grande (ou plus petite) valeur qui est inférieure (ou supérieure) à la limite définie par $1,5 \times (Q3 - Q1)$. Ainsi, les valeurs qui se situent au-delà sont des données dites atypiques, à considérer avec précaution, car elles peuvent être aberrantes. »

Exclure des données valides en les considérant possiblement « aberrantes » ne nous semble pas scientifiquement acceptable à l'exception d'une erreur de mesure. Cela ne semble cependant pas être le cas. Les valeurs extrêmes peuvent résulter d'hétérogénéités locales. Toutes les données doivent être

présentées si les conditions expérimentales sont conformes. Ainsi le lecteur peut apprécier la variabilité du jeu de données.

5. Évolution de l'EDZ : Une hypothèse raisonnablement prudente, que nous approuvons, serait de supposer que l'EDZ ne se cicatrise pas complètement pour donner lieu à une perméabilité *in situ* et/ou un état de contrainte. En fait il pourrait être préférable de présumer que les dégâts les plus pénalisants estimés pour l'EDZ vont se maintenir tout au long de la vie du site de stockage.

IEER 2025 : Le chapitre 3 de l'Andra Socle 2022 (Les processus en grand de l'évolution phénoménologique) présente une analyse solide du développement de l'EDZ pendant et peu après l'excavation. Y est inclus notamment le développement de la fracturation et son influence sur le développement de la perméabilité. La modélisation du développement des fractures est particulièrement convaincante. Une grande partie de l'analyse est fondée sur les travaux réalisés dans le laboratoire souterrain de Bure. La section 3.8 de ce chapitre décrit la production de fractures à proximité immédiate des forages dans la zone de stockage des déchets ainsi que celles associées aux travaux de construction nécessaires pour accéder à cette zone.

L'une des principales réalisations des travaux menés dans le laboratoire souterrain a consisté à observer dans l'EDZ, l'évolution, au fil du temps, des fractures et de la perméabilité associée comparée à la perméabilité de la roche hôte non endommagée (ANDRA Socle 2022, p. 549) :

« La résaturation des argilites fracturées (*i.e.* zones fractures à l'échelle d'un ouvrage) induit une diminution de la perméabilité dans le temps. L'arrivée d'eau conduit à une diminution dans le temps (mais rapide) de la perméabilité de plusieurs ordres de grandeur jusqu'à s'approcher de celle de l'argilite saine. Les nombreuses conditions d'environnement (état de contrainte, température, nature des fluides de percolation...) et les différents types de fractures et géométries testées n'ont pas révélé de cas pour lesquels il n'y a pas de cicatrisation hydraulique. »

« Les principaux processus à l'origine de la cicatrisation hydraulique sont bien identifiés et ils sont cohérents avec les observations sur échantillons et *in situ* : l'arrivée d'eau entraîne le gonflement des minéraux smectites (minéraux argileux gonflants) contenus dans l'argilite, qui ferme des fractures. L'application d'une contrainte mécanique perpendiculairement aux fractures aide au colmatage, et donc à la cicatrisation hydraulique. »

Le processus de cicatrisation des fractures est clairement décrit, ainsi que les observations sur lesquelles il repose. Les incertitudes à cet égard sont jugées faibles. Cela répond à l'une des préoccupations exprimées par l'IEER dans son rapport de 2011. Deux questions importantes demeurent toutefois en suspens :

- i. la transposition des conclusions relatives aux fractures du laboratoire souterrain à la ZIOS, où les déchets seront stockés à terme.
- ii. l'incapacité de la porosité à revenir à des valeurs proches de celles de la roche intacte, y compris dans l'évolution à long terme de l'EDZ et la production de grandes quantités d'hydrogène due à la corrosion des métaux sur des milliers d'années.

i. Transposition des résultats du laboratoire à la ZIOS

Les chapitres 2 et 3 du document de l'Andra Socle 2022 décrivent la géologie, notamment la composition des couches situées au-dessus de la zone de stockage des déchets ainsi que celle de la zone même de stockage. Il apparaît clairement que les caractéristiques physiques et chimiques de la roche changent rapidement avec la profondeur – en quelques dizaines de mètres – entre la zone USC (unité silto-carbonatée) située juste au-dessus de la zone de stockage UA (unité argileuse) et la UA. La résistance à la compression et à la traction de la roche varie également considérablement. Toutes les deux diminuent avec l'augmentation de la profondeur et la diminution de la teneur en carbonates entre la couche USC (à partir de 445 mètres sous la surface) et la couche de stockage UA (Andra Socle 2022, p. 477 et figure 3-117, p. 545). (Voir aussi le chapitre VI.)

ii. Porosité de l'EDZ

Si la perte de perméabilité due à la fracturation de la roche hôte est restaurée à une valeur proche de celle de la roche intacte après contact avec l'eau, ceci n'est pas le cas pour la taille des pores (ANDRA Socle 2022, p. 549) :

« En revanche, le colmatage des fractures ne permet pas de retrouver des propriétés de transfert au gaz comparables à celles de l'argilite saine. Ceci se traduit notamment par des pressions d'entrée de gaz significativement plus faibles que celle de l'argilite saine. Ceci est interprété par une organisation porale de l'argilite au niveau de la fracture colmatée qui, malgré le colmatage, est significativement différente de celle de l'argilite saine, en particulier en termes de taille de pores plus élevée. En revanche, le coefficient de diffusion des solutés dans une argilite fracturée dont les fractures ont été colmatées est proche de celui mesuré dans l'argilite saine. »

Cette augmentation de la taille des pores a un impact négatif sur la perméabilité. L'évolution de la taille des pores sur de longues périodes reste préoccupante. Ce problème pourrait s'aggraver à long terme, notamment en raison de la production de milliers de tonnes d'hydrogène résultant de la corrosion des métaux (Andra Socle 2022, section 3.6). (Voir aussi le chapitre VI, section 3.a.)

Pour conclure, la question de la cicatrisation à court terme des fractures induites par la construction dans la zone EDZ, soulevée dans le rapport 2011 de l'IEER, a été traitée de manière satisfaisante, à l'exception de la transposition des résultats du laboratoire à la ZIOS. Les recherches en laboratoire montrent une augmentation de la taille des pores induite par la construction, dont une partie semble irréversible. L'évolution à long terme de la perméabilité dans la zone EDZ reste donc une faiblesse et une lacune évidentes, notamment en ce qui concerne ses performances après fermeture.

6. Les facteurs du fluage de l'argilite : Dans un site de stockage, le comportement du fluage de l'argilite est une fonction complexe avec au moins trois paramètres qui varient tous, dans l'espace et le temps. Plus précisément, les tests montrent que la contrainte déviatorique, la saturation et la température affectent

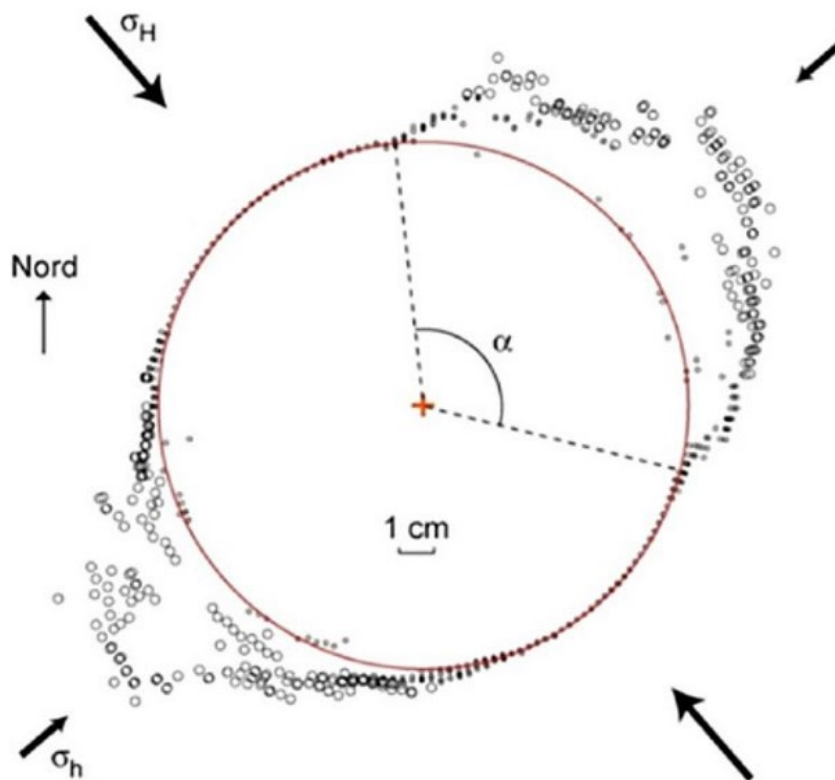
toutes, de manière significative, le taux de fluage. L'interrelation de ces facteurs environnementaux et leurs effets sur la performance du stockage semble avoir été traités de façon plutôt qualitative. Une meilleure intégration de l'influence combinée de ces facteurs est nécessaire.

IEER 2025 : L'Andra a mené d'importantes expérimentations et modélisations des impacts des contraintes déviatoriques, de la température et de l'humidité sur la fracturation et le fluage. Cela ressort clairement des descriptions figurant dans différentes parties du document de l'Andra Socle 2022, telles que les sections 2.9.3, 3.9 et 3.10. La principale question soulevée par l'IEER concernant les connaissances quantitatives sur le fluage a donc été traitée. Néanmoins, certaines préoccupations subsistent. La première concerne les incertitudes décrites dans le résumé de la section 3.9 (Andra Socle 2022, p. 498) :

« Les incertitudes résiduelles portent principalement sur le comportement différé à long terme de la zone fracturée. En particulier, il est nécessaire d'avoir une meilleure compréhension et quantification des différents mécanismes se produisant dans la zone fracturée au cours du temps et sur l'existence ou non d'un seuil auquel les déformations différées s'arrêteraient : en lien avec la condition aux limites apportée par le revêtement/soutènement (déformabilité plus ou moins grande), les vitesses de déformation différée de la zone fracturée, déjà faibles, évoluent plus ou moins rapidement, et tendent à diminuer continûment dans le temps. »

La section 2.9.3.1.2 décrit la production et l'évolution des « breakouts » dans la direction des contraintes les plus faibles à une profondeur de 511,3 mètres (figure 2-86 reproduite ci-dessous). Andra Socle 2022, p. 182 décrit les résultats suivants dans les forages verticaux et déviés :

« Les « breakouts » ont été identifiés dans le forage vertical EST104, sur la quasi-totalité de l'unité lithologique UA du Callovo-Oxfordien. D'autres sont observables dans les forages verticaux EST312 et EST363, ainsi que dans les forages déviés EST211 et EST361, sans s'y développer aussi nettement ni aussi continûment que dans le forage EST104 et en restant limités aux niveaux les plus argileux (ceux de moindre résistance mécanique). L'analyse statistique de leur géométrie est donc moins robuste, outre le fait qu'elle est probablement biaisée dans les forages déviés (EST312, EST361 et EST363), par « l'usinage » de la paroi par le train de tiges de forage (« keyseat »). »



« Figure 2-86 Section à la droite du forage EST104 à la profondeur 511,3 mètres montrant la présence de « breakouts » »

Source : Andra Socle 2022.

Des travaux importants semblent nécessaires pour consolider l'analyse, même dans le contexte de l'environnement du laboratoire. La composition des roches et les valeurs spécifiques des contraintes jouent un rôle dans la fréquence et l'amplitude des fractures ainsi que dans leur évolution dans le temps. La transposition des données relatives aux fractures, au fluage et à la convergence doit tenir compte des variations importantes de la composition des roches sur quelques dizaines de mètres, comme indiqué ci-dessus dans le contexte de l'évolution des fractures et de la taille des pores. La transposition des données du laboratoire à la ZIOS nécessitera un échantillonnage et une analyse approfondis *in situ*. Plus précisément, nous recommandons de recueillir des preuves convaincantes *in situ* dans la ZIOS, à la profondeur d'implantation et à proximité de celle-ci, concernant les fractures, la convergence et le fluage et de la roche hôte dans la ZIOS. La réduction des incertitudes liées à la production et à la propagation des fractures et du fluage dans l'environnement spécifique de la roche hôte de la ZIOS est un élément indispensable du travail à accomplir dans le cadre de la phase pilote industrielle.

Références:

Andra Socle 2022. 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, Décembre.

III. Introduction

Le Comité local pour l'information et le suivi (CLIS) a chargé l'Institut de recherche sur l'énergie et l'environnement (IEER) de réaliser une évaluation ciblée de la demande d'autorisation de création (DAC) d'un centre de stockage géologique (Cigéo) déposée par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra). Un décret d'autorisation permettrait à l'Andra de commencer la construction d'un site d'enfouissement dans des formations géologiques profondes pour les déchets radioactifs de haute activité à vie longue (HA-VL) et les déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL).

A deux reprises, à la demande du CLIS, l'IEER avait déjà évalué les recherches de l'Andra menées dans le laboratoire de Bure et avait remis un rapport en 2004 (IEER 2004) et un autre en 2011 (IEER 2011). Cette nouvelle mission fait donc suite aux deux précédentes.

Les quatre volets de cette évaluation sont, selon les termes de référence techniques du projet (CLIS 2024) :

- 1) Volet 1 – « **la définition du terme source** » : Cette partie de l'examen consiste à évaluer la pertinence technique et l'exhaustivité des scénarios de la DAC pour la prise en charge des différents déchets radioactifs qui sont destinés à être enfouis dans le Cigéo. Ce volet comprendra également une description du système français de classification des déchets radioactifs afin de fournir le contexte nécessaire à l'analyse du terme source (Chapitre IV).
- 2) Volet 2 – « **l'évaluation de la performance de la roche hôte à long terme** » : Cette partie de la revue analysera les modélisations hydrogéologiques de l'Andra (Chapitre V).
- 3) Volet 3 – « **la prise en compte exhaustive des paramètres utiles à l'analyse de performance** » : L'évaluation des paramètres porte principalement sur deux aspects : la pertinence technique et l'exhaustivité de l'analyse des performances hydrogéologiques de l'Andra dans le choix et l'utilisation des paramètres. Elle sera intégrée dans le chapitre sur l'évaluation des performances. (Chapitre V.)
- 4) Volet 4 – « **des propositions sur le programme de recherche devant être menées pendant la phase industrielle pilote** » : Cette tâche consiste à examiner la pertinence des propositions de l'Andra pendant la phase pilote industrielle (Phipil) dont l'objectif est d'assurer une base scientifiquement et techniquement fiable pour construire et exploiter le site d'enfouissement dans la phase industrielle complète. Une partie de ce volet concerne les exigences spécifiques des tâches décrites ci-dessus et sera intégrée à celles-ci. Il s'agira notamment de tenir compte (i) des déchets que l'Andra envisage de stocker pendant la Phipil ; (ii) les tests que l'Andra devrait mener pendant la Phipil pour s'assurer d'une transposition fiable de certaines données entre le laboratoire souterrain et Cigéo ; (iii) de la recherche nécessaire pendant la Phipil pour s'assurer que la température de la roche hôte restera uniformément en dessous de 100°C pendant la phase post-fermeture, étant donné les différents types de colis HA qui seront stockés dans le quartier de stockage HA ; et (iv) des questions que l'Andra doit adresser pendant la Phipil pour examiner les conséquences pour la phase opérationnelle dans l'éventualité d'un effondrement de l'AMOC dans les prochaines décennies – un risque que des études récentes estiment significativement plus élevé (Chapitre VI).

Une exigence spécifique de la mission confiée à l'IEER consiste à « vérifier que certaines recommandations faites dans le rapport réalisé par l'IEER pour le compte du CLIS en 2011 soient prises en compte et trouvent une réponse satisfaisante dans le dossier de la DAC. Les recommandations

antérieures (IEER 2011) qui sont pertinentes et la manière dont elles ont été ou non prises en compte sont discutées en chapitre II ci-dessus. Il convient de préciser que toutes les recommandations antérieures ne seront pas réexaminées, puisqu'il s'agit d'un examen partiel. Par exemple, les questions sismiques ne sont pas abordées dans ce rapport.

IV. Le terme source

Auteur principal : Arjun Makhijani

Nous examinons d'abord le système de classification des déchets afin de mettre en contexte la discussion sur les éléments spécifiques du terme source – les déchets radioactifs qui seront stockés dans Cigéo, s'il est autorisé. Ensuite, nous examinons

- les inventaires définis par l'Andra – l'inventaire de référence et l'inventaire de réserve ;
- les lacunes dans les inventaires ;
- la question d'autres « matières radioactives » qui ne sont pas actuellement classifiées comme déchets mais qui pourraient l'être.

1. Classification des déchets

La France dispose d'un système élaboré de classification des déchets radioactifs. Toutefois, les définitions se rapportant aux déchets radioactifs diffèrent, rendant difficile l'analyse des documents. Par exemple, le rapport Andra 2024 définit les déchets de haute activité (HA) comme des déchets contenant des radionucléides dont la demi-vie peut atteindre « jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années » (Andra 2024, p. 10) ; par contre, aucune limite quantitative inférieure de la demi-vie n'est spécifiée. Cependant, étant donné que les déchets HA sont aussi souvent appelés HA-VL (vie longue), une certaine demi-vie minimale est implicite. Dans le même temps, l'expression « jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années » semble exclure les radionucléides dont les demi-vies sont supérieures à un million d'années, comme l'iode 129, le césium 135 et le neptunium 237. Or, ce n'est clairement pas le cas, puisque l'Andra a affirmé que ces radionucléides sont inclus dans le terme source (Andra 2024b).

Dans le même temps, on peut trouver des définitions plus précises au sein du même document. À la page 9, le rapport Andra 2024 définit les déchets « à vie longue » comme étant ceux dont la demi-vie est supérieure à 31 ans ; ces définitions sont reproduites dans le tableau IV-1. Elles correspondent presque entièrement à celles utilisées dans le présent rapport, bien que des précisions aient été ajoutées afin de rendre l'analyse de ce rapport aussi transparente que possible. Les deux premières catégories de déchets – les HA-VL et les MA-VL (moyenne activité-vie longue) – doivent, en vertu de la loi de 2006, être stockées dans un site de stockage en couches géologiques profondes. Il y a aussi des quantités importantes de FA-VL (faible activité-vie longue).

La France comptabilise également 50 millions de tonnes de déchets issus de l'extraction et du traitement de l'uranium (Andra 2024, p. 22) datant de la période où l'uranium était exploité domestiquement.¹ Un certain nombre d'autres déchets, dont les milliers de tonnes rejetées en mer entre 1967 et 1982 et les déchets liés aux essais d'armes nucléaires en Polynésie, sont également mentionnés dans le rapport Andra 2024 (p. 22).

¹ Les déchets issus de l'extraction et du traitement de l'uranium importés en France ne sont pas mentionnés dans Andra 2024.

Tableau IV-1 : Le système de classification des déchets de l'Andra (Note 1)

Types de déchets	Activité spécifique	Demi-vie (Note 2)	Commentaires
Haute activité (HA ou HA-VL)	« de l'ordre de plusieurs milliards Bq/g »	>31 ans	> un milliard Bq/g est utilisé dans le présent rapport
Activité moyenne à vie longue (MA-VL)	« de l'ordre d'un million à un milliard Bq/g »	> 31 ans	Une fourchette d'un million à un milliard de Bq/g est utilisée dans le présent rapport.
Faible activité à vie longue (FA-VL)	« entre quelques centaines de Bq/g et un million de Bq/g »	>31 ans	Une fourchette de 100 Bq/g et au million de Bq/g est utilisé dans le présent rapport.
Très faible activité	<100 Bq/g	100 jours à 31 ans	
Vie très courte	Peut varier de <100Bq/g à un milliard de Bq/g	<100 jours	

Note 1 : L'IRSN a défini des classifications de déchets similaires à celles adoptées ici (IRSN 2013).

Note 2 : Les fourchettes de demi-vie utilisées dans le présent rapport sont les mêmes que celles de ce tableau et de l'IRSN 2013.

Sources : Andra 2024, p. 9 ; IRSN 2013.

Un certain nombre de matières radioactives ne sont pas considérées comme des déchets, notamment l'uranium naturel sous forme de « yellow cake » (point de départ pour la conversion de l'uranium en UF₆, de l'enrichissement de l'uranium et de la fabrication du combustible d'uranium faiblement enrichi pour les réacteurs du type REP), le plutonium et l'uranium séparés du combustible usé qui pourraient, moyennant un traitement et une fabrication appropriés, être transformés en combustible de réacteur, ainsi que l'uranium appauvri. Certaines de ces matières pourraient ne pas trouver d'utilisation et, dans ce cas, devraient être reclassées comme déchets. Ce chapitre abordera certaines questions relatives à une éventuelle reclassification des matières radioactives en déchets radioactifs dans la mesure où elles pourraient avoir une incidence sur le stockage géologique en profondeur.

2. Les deux scénarios de base pour les termes sources

L'Andra définit deux scénarios pour les termes sources HA-VL et MA-VL qui seraient stockés dans Cigéo, si celui-ci est autorisé :

- L'inventaire de référence ; et
- L'inventaire de réserve.

Le premier, l'inventaire de référence, « est la base sur laquelle les différents aspects de la sûreté et de l'exploitabilité du Cigéo sont censés être démontrés. » (Andra Inventaire 2022, p. 6.) C'est à dire « *Le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence* » (ANDRA Pièce 7

Vol. 1 2022, p. 21). À ce titre, l'inventaire de référence doit être cohérent et inclure des déchets qui parviendront de toutes les installations pour établir cet inventaire.

Le deuxième, l'inventaire de réserve, présente une vision plus large de l'avenir de l'énergie nucléaire et « *prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique. Le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence* » (ANDRA Pièce 7 Vol. 1 2022, p. 21). En fait, l'inventaire de réserve est conçu pour estimer la quantité de déchets qui seront « réellement stockés » (Andra Inventaire 2022, p. 6, c'est nous qui soulignons) :

« Pour tenir compte des évolutions possibles entre l'inventaire qui a été pris en compte dans les études de conception [c'est-à-dire, l'inventaire de référence] et celui *des déchets qui seront réellement stockés* dans l'INB Cigéo, le code de l'environnement a introduit la notion de l'inventaire de réserve. »

À ce titre, l'inventaire de réserve doit être aussi complet que possible afin de démontrer l'adaptabilité du site. Spécifiquement, l'inventaire de réserve devrait refléter la politique énergétique actuelle.

Dans les scénarios qui constituent la base de l'inventaire de référence et celle de l'inventaire de réserve, les quantités de radioactivité les plus importantes qui seraient stockées dans Cigéo proviennent de la production d'énergie nucléaire dans le parc français de réacteurs à eau pressurisée. Cinquante-six sont actuellement en service ; deux autres, construits dans les années 1970 à Fessenheim, ont été arrêtés en 2020. Un EPR (« European pressurized reactor »), à Flamanville, a été mis en service en 2024. En outre, certains déchets proviennent des huit réacteurs gaz-graphite qui ont été les premiers réacteurs en France. Ceux-ci sont tous définitivement arrêtés, le dernier dans les années 1990. Leur combustible utilisé a été retraité dans l'usine UP2-400 de La Hague, laquelle est en cours de démantèlement.

L'essentiel de la radioactivité des déchets HA-VL provient du retraitement du combustible utilisé issu de la production d'énergie. Les produits de fission séparés lors du retraitement sont vitrifiés et le verre fondu est versé dans des conteneurs spéciaux en acier inoxydable. La quasi-totalité du reste de la radioactivité se trouve dans les MA-VL, dont une grande partie provient également des opérations de retraitement. Fin 2022, 97,2 % de la radioactivité des déchets radioactifs français se trouvait dans les HA-VL ; 2,67 % dans les MA-VL, ce qui ne laissait que 0,13 % de la radioactivité dans les déchets de faible activité, qui représentent 97,5 % du volume (Andra 2024, p. 21). Le terme source pertinent pour Cigéo dépend donc essentiellement de l'évolution de la production de l'énergie nucléaire en France.

L'Andra a décrit l'inventaire de référence comme suit (Andra Pièce 7 Vol. 1 2022, p. 22) :

« l'inventaire de référence correspond à la production des déchets issus des installations disposant de leur décret de création à la date d'évaluation des quantitatifs dans un scénario de poursuite de la production électronucléaire avec une hypothèse de durée de fonctionnement des réacteurs nucléaires existants de 50 ans, et de retraitement de la totalité des combustibles utilisés produits par ces installations dans le parc actuel et dans un parc futur ;

« les déchets qui seront produits par l'exploitation des installations nucléaires en cours de construction sont également pris en compte (notamment l'EPR de Flamanville, le réacteur expérimental Jules Horowitz, l'installation de recherche ITER) ;

« les déchets produits par un éventuel futur parc ne sont pas pris en compte dans cet inventaire de référence. »

Le parc nucléaire opérationnel français se compose de 56 réacteurs à eau pressurisée ; deux réacteurs à Fessenheim ont été définitivement arrêtés. En outre, une unité du réacteur évolutif à eau pressurisée (EPR) de Flamanville a été mise en service en 2024.

Le tableau IV-2 présente l'inventaire de référence ainsi que les stocks de déchets HA et MA-VL à la fin de 2022 et le total ultime envisagé dans le scénario SR2.

Tableau IV-2 : Inventaire de référence, scénario SR2

	Inventaire 2022	Inventaire de référence (Note 1)	
	m ³	m ³	Nombre de colis
HA	4 420	10 000	56 000
MA-VL	39 600	73 000	167 000
Combustibles usés (Note 2)	0	0	0
FA-VL	104 000	0	0

Note 1 : L'EPR de Flamanville est supposé fonctionner pendant 60 ans (IRSN 2024, Tableau T4-1). Les volumes de déchets MA-VL et les conteneurs résultant du démantèlement futur d'ITER sont inclus. Les autres réacteurs à eau légère fonctionneraient pendant 50 ans.

Note 2 : Tous les combustibles usés, y compris les combustibles usés MOX, sont retraités ; le réacteur à neutrons rapides (RNR) est déployé.

Sources : Andra 2024, p. 18 ; Andra 2024a, diapositive 30 ; et Andra 2019, p. 7.

L'inventaire de réserve présente une vision plus large de l'avenir de l'énergie nucléaire et « *prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique. Le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence* » (Andra Pièce 7 2022, p. 21). À ce titre, l'inventaire de réserve doit être aussi complet que possible afin de démontrer l'adaptabilité du site.

Deux scénarios d'inventaire de réserve ont été développés. Dans l'inventaire de réserve appelé « SR1 », tout le combustible usé, y compris le MOX, est retraité ; tout le plutonium séparé est transformé en combustible et utilisé. Les réacteurs à eau légère de 900 MWe fonctionneront 10 ans de plus que dans le scénario SR2, car ce sont les réacteurs dans lesquels un cœur partiel de combustible MOX peut être chargé. Des réacteurs à neutrons rapides (RNR) seront déployés pour utiliser le plutonium, s'ajoutant aux réacteurs à eau légère sous pression (REP) qui sont chargés en combustibles MOX. Dans l'inventaire de réserve appelé scénario SNR « enveloppe », le retraitement est arrêté, ce qui réduirait le volume des déchets vitrifiés de haute activité. Par contre, une quantité de combustible usé, y compris le combustible usé MOX, devra être stockée (Andra Pièce 7 Vol. 1, 2022, pp. 25-26 ; Andra 2019) ; voir le tableau IV-3 ci-dessous.

Le tableau IV-3 présente les principaux éléments de l'inventaire de réserve.

	Scénario SR1		Scénario SNR « enveloppe »		Commentaires
	m ³	Nombre de colis	m ³	Nombre de colis	
HA	12 000	66 000	7 000	37 000	Note 1
MA-VL	73 000	167 000	69 000	142 000	
Combustibles usés	0	0	14 000	58 000	
FA-VL	110 000	51 000	110 000	51 000	Note 2

Note 1 : Dans le scénario SR1, pour utiliser tout le plutonium, y compris le plutonium récupéré lors du retraitement du combustible usé MOX, l'exploitation des réacteurs à eau légère de 900 MWe sera prolongée de 10 ans, auxquels s'ajoutera l'exploitation d'un RNR (réacteur à neutrons rapides). Les EPR seront également chargés en combustible MOX.

Note 2 : La diapositive 30 de l'Andra 2024a ne mentionne que le graphite FA-VL alors que, la pièce 7 Vol. 1, 2022 de l'Andra (p. 26) mentionne le même volume de FA-VL mais y inclut « les déchets dits « UNGG de La Hague » ; « les déchets bitumés à ce stade considérés comme relevant de la catégorie FA-VL » ; « les déchets de l'Andra (sources, paratonnerres et déchets de la Défense nationale) aujourd'hui considérés comme relevant de la catégorie FA-VL ».

Sources : Andra Pièce 7 Vol. 1 2022, pp. 21-26 et Andra 2024a, Slide 30.

3. Commentaires sur les inventaires de référence de réserve

a. L'inventaire de référence

Selon la pièce 7, vol. 3, du DAC (p. 11), l'inventaire de référence omet certains déchets provenant des installations qui seront nécessaires pour répondre à ses hypothèses concernant le retraitement et l'utilisation complète du plutonium séparé et de l'uranium retraité :

« il [c'est-à-dire, l'inventaire de référence] considère que les matières (uranium et plutonium) non valorisées dans les réacteurs REP du parc actuel et l'EPR de Flamanville pourront l'être dans des installations futures. Les déchets produits par un éventuel futur parc de réacteurs ne sont pas pris en compte. »

L'omission des réacteurs et d'autres installations nécessaires pour garantir qu'il ne restera plus de combustible usé non retraité (qu'il s'agisse d'UO₂ ou de MOX) et qu'il ne restera pas de plutonium séparé rend l'inventaire de référence fondamentalement incomplet. En fait, il n'existe actuellement aucun réacteur certifié capable d'utiliser le plutonium séparé du combustible MOX. Comme indiqué dans l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (Andra 2024c, p. 28), la question de l'utilisation du plutonium séparé du combustible MOX usé doit encore être étudiée :

« Même si techniquement le traitement des combustibles MOX irradiés est possible à l'usine Orano de La Hague, les caractéristiques de la matière contenue dans ces assemblages sont telles que le traitement des MOX à un niveau industriel nécessite d'être étudié. Par ailleurs, si les matières contenues dans les assemblages MOX usés

sont plus adaptées pour une utilisation dans des réacteurs de technologie RNR, cette dernière ne sera pas disponible à l'échelle industrielle d'ici la fin du siècle. »

Au moment de la rédaction du présent rapport, aucun projet RNR majeur n'est en phase de conception active. Le projet ASTRID, qui faisait suite à la fermeture de Superphénix en 1998, a été annulé en 2019. Comme le souligne l'Andra dans la citation ci-dessus, aucun réacteur à l'échelle industrielle ne devrait être disponible en France avant la fin du XXI^e siècle. Selon l'IEER, cela est beaucoup trop spéculatif pour concevoir un inventaire sur lequel fonder la sécurité et l'opérabilité de Cigéo. L'inventaire de référence est incomplet puisqu'il ne comprend pas toutes les installations nécessaires à l'élimination du stock de plutonium, qu'il soit déjà séparé ou dans le combustible usé généré par le parc actuel de réacteurs.

b. L'inventaire de réserve

L'inventaire de réserve, présenté dans le tableau IV-3 ci-dessus, a été défini avant les changements dans la politique énergétique française lesquels ont considérablement élargi de l'emploi de l'énergie nucléaire. Comme indiqué ci-dessus, six nouveaux réacteurs EPR2 sont prévus ; huit autres pourraient s'y ajouter, bien qu'aucune décision définitive n'ait encore été prise à leur sujet. L'Andra a été chargée d'étudier l'impact des 6 EPR2 sur les besoins en matière de stockage des déchets. Ses conclusions sont les suivantes (Andra 2024a, diapositive 31) :

« Absence d'impacts majeurs sur les principes de conception

- « Durée de décroissance de la puissance résiduelle en entreposage des Mox = + 20 ans »
- « Aucun aspect a priori rédhibitoire à une prise en charge dans Cigéo des déchets de 6 réacteurs EPR2 »

Il est clair que ces six réacteurs ajouteraient des quantités importantes de déchets HA et MA-VL. Ils prolongeraient également de 20 ans la durée de stockage du MOX. Une quantité importante de plutonium séparé du combustible MOX usé serait aussi produite avec pour conséquence un éventuel impact négatif sur la période d'exploitation de Cigéo et probablement sur son coût.

Les huit EPR2 augmenteraient encore les quantités de déchets. Il est clair que l'évolution de la politique énergétique nucléaire ajoute une incertitude considérable au projet Cigéo dont il faut tenir compte. Ni l'inventaire de référence, ni l'inventaire de réserve, n'y répondent.

4. Définition d'un terme source dans le contexte de l'incertitude de la politique énergétique

L'évolution rapide de la politique énergétique nucléaire française a introduit des complications et des incertitudes importantes dans le projet Cigéo. Comme l'examen ci-dessus de l'inventaire de réserve le montre, la quantité d'énergie nucléaire produite est devenue une cible en constante évolution. Cette section examine deux scénarios que l'ANDRA devrait développer, à partir d'un terme source qui correspondrait aux limites de ce que le site pourrait accueillir.

a. Examen des récents développements dans la politique énergétique nucléaire

En France, la politique relative à l'énergie nucléaire a connu de considérables changements, comme dans bien d'autres pays. Après l'accident de Fukushima en 2011, l'urgence de réduire le rôle de l'énergie nucléaire s'est répandue dans un certain nombre de pays, une tendance renforcée par les retards et les dépassements de coûts de la technologie EPR. Toutefois, ces dernières années, cette tendance vers une diminution du rôle de l'énergie nucléaire s'est inversée

En France, la Programmation pluriannuelle de l'énergie de 2019 prévoyait de réduire la part de l'électricité nucléaire à 50 % d'ici 2040. Cet objectif a depuis été abandonné. Le gouvernement a demandé à l'Andra d'examiner l'impact de six EPR supplémentaires, d'une conception modifiée appelée EPR2 (Andra 2024, p. 19). Huit EPR2 supplémentaires pourraient être construits, pour un total de 14. Ces propositions s'ajoutent aux projets français de petits réacteurs modulaires. Plus précisément, Électricité de France a créé une filiale, Nuward, pour développer son « Small Modular Reactor » à eau pressurisée destiné à remplacer les centrales au charbon dans la gamme des 300 à 400 MWe (Nuward 2025).

En outre, dans certains cas, le retraitement du combustible MOX usé et l'utilisation de tout le plutonium récupéré comme combustible pour les réacteurs sont également envisagés. Cela nécessitera très probablement le développement, la construction et le déploiement de réacteurs à neutrons rapides (RNR) à l'échelle industrielle, un processus qui, selon l'ANDRA, ne commencerait qu'à la fin de ce siècle (comme indiqué ci-dessus). L'utilisation du plutonium dérivé du MOX devrait donc se prolonger jusqu'au XXI^e siècle.

En conséquence, il pourrait y avoir une vingtaine de gigawatts (ou plus) de capacité nucléaire supplémentaire en France d'ici la fin du vingt-et-unième siècle et au-delà. Si cela se réalisait, toute une série de questions pour Cigéo se poserait :

- Quelle quantité de combustible usé sera générée ?
- Sera-t-il retraité ? Si oui, quelles seront les charges thermiques des colis HA : comme HA1 ? HA2 ? Autres ?
- Faudra-t-il construire une nouvelle usine de retraitement, sachant que les nouveaux EPR et SMR pourront fonctionner jusqu'au 22^{ème} siècle et que les usines UP2-800 et UP3-800 ont été construites vers la fin du 20^{ème} siècle ?

La politique énergétique n'est, bien sûr, pas du ressort de l'Andra ; mais celle-ci est tenue de traiter les questions du stockage géologique qui découleront des décisions de la politique énergétique française. Pour l'instant, un terme source définitif est nécessaire pour la DAC qui reflète l'état actuel de la politique énergétique pour les trois raisons suivantes :

1. pour planifier les opérations du site de manière appropriée pendant la période d'exploitation et pour effectuer des évaluations de performance après fermeture ;
2. pour examiner la capacité du site à accueillir davantage de déchets et déterminer la quantité maximale admissible et
3. pour modéliser la performance après fermeture avec un terme source qui est aussi réaliste que possible – c'est-à-dire, avec un terme source qui reflète la politique énergétique actuelle de façon réaliste.

b. Scénarii supplémentaires de l'Andra

L'Andra a publié quatre scénarii qui tiennent compte de l'évolution de la politique énergétique (Andra 2024, pp. 25-26). Les quatre scénarios (tableau IV-4) tiennent compte de six nouveaux réacteurs EPR2 et anticipent l'arrêt et le démantèlement de 12 réacteurs du parc actuel entre 2027 et 2035. Aucun ne prend en compte les huit réacteurs EPR2 supplémentaires qui ont été récemment proposés.

Tableau IV-4 : Les quatre nouveaux scénarii rédigés par l'Andra

	S1	S2	S3	S4
	Utilisation 100% du Pu	Monocycle de retraitement	Arrêt du retraitement en 2040	Arrêt du retraitement en 2040/arrêt progressif du nucléaire
Combustible utilisé de l'U naturel (UNE), t HM	0	0	14 500	14 500
Combustible utilisé de l'U retraité (URT), t HM	0	6 110	6 110	6 110
Combustible utilisé MOX, t HM	0	5 030	5 030	5 030
Combustible utilisé des réacteurs à neutrons rapides (RNR), t HM	0	149	149	149
Déchets HA (haute-activités) vitrifiés	11 800	8 960	6 890	6 890
Uranium appauvri, t HM	0	899 000	899 000	899 000

Source : Andra 2024, p. 26.

Il convient de noter que le volume de déchets HA dans le scénario S1 est à peu près identique à celui de l'inventaire de réserve SR1 (tableau IV-3 ci-dessus). La raison tient probablement au fait que les déchets supplémentaires provenant des six réacteurs EPR2 compensent approximativement les mises hors service supplémentaires prévues dans le scénario S1, bien que dans le rapport Andra 2024, la source des scénarios S1, ne soit pas explicitement précisée. Quoi qu'il en soit, les réacteurs à neutrons rapides nécessaires pour consommer le plutonium provenant du combustible utilisé des réacteurs existants, y compris le combustible MOX utilisé, ainsi que le plutonium récupéré lors du retraitement des réacteurs à neutrons rapides eux-mêmes, ne sont pas pris en compte. Comme indiqué ci-dessus, l'Andra ne prévoit même pas la mise en service d'un réacteur à neutrons rapides à l'échelle industrielle avant la fin du XXI^e siècle.

Il convient également de noter que le scénario S1 ne prévoit aucun résidu d'uranium retraité ni d'uranium appauvri. Malgré les utilisations de l'uranium appauvri en dehors de l'industrie nucléaire et son utilisation dans la fabrication de combustible MOX, les stocks d'uranium appauvri continuent d'augmenter. Comme l'a noté l'ASN, l'utilisation de l'uranium appauvri pour la fabrication de combustible MOX représente moins de 2 % de l'augmentation annuelle des 6 720 tonnes du stock d'uranium appauvri (ASN 2020, p. 7).

L'uranium appauvri « pourrait être utilisé à grande échelle dans les éventuels réacteurs à neutrons rapides [RNR] de quatrième génération, selon les concepteurs » (ASN 2000, p. 6). Mais pour cela, il faut d'abord le convertir en plutonium. Généralement cela se ferait dans des réacteurs RNRs. Si c'est la voie

supposée dans le scénario S1 pour éliminer le stock de l'uranium appauvri, il est à noter que les déchets HA résultants de cette utilisation n'ont pas été pris en compte.

L'uranium appauvri peut aussi être réenrichi pour produire du combustible nucléaire (ASN 2020, p. 6), mais cela ne diminuerait pas significativement la quantité de l'uranium appauvri.² Le scénario S1 prévoit aussi que tout le combustible usé sera retraité et que le plutonium et l'uranium ainsi récupérés seront utilisés.

La consommation de l'ordre d'un demi-million de tonnes d'uranium appauvri dans des réacteurs à neutrons rapides serait un exercice qui mettrait à rude épreuve toute tentative de crédibilité. Il faudrait environ 10 000 ans à un parc de 50 réacteurs à neutrons rapides pour utiliser les 500 000 tonnes d'uranium appauvri (converties en plutonium) qui représentent approximativement la croissance du stock d'uranium appauvri d'ici 2050. En supposant une durée de vie de 50 ans pour un réacteur, il faudrait en construire 10 000 pour tout consommer. Le raisonnement qui sous-tend l'avis de l'ASN selon lequel une partie substantielle de l'uranium appauvri doit être considérée comme un déchet est solide et très clair. L'ASN a aussi noté la même chose en termes semi-quantitatifs (ASN 2020, p. 7, c'est nous qui soulignons):

« ...des scénarios de multirecyclage des matières radioactives permettant l'utilisation d'uranium appauvri...montrent que le stock d'uranium appauvri croît jusqu'au déploiement d'un parc *composé exclusivement de réacteurs à neutrons rapides, représentant alors l'équivalent de plusieurs millénaires de fonctionnement d'un tel parc...* »

Les trois autres scénarios, S2, S3 et S4, qui n'incluent pas les réacteurs à neutrons rapides, prévoient une augmentation des stocks d'uranium appauvri de 331 000 tonnes en 2022 (Andra 2024, p. 16) à 899 000 tonnes, soit une augmentation de plus d'un demi-million de tonnes. Les scénarios S3 et S4, qui prévoient six réacteurs EPR2 et l'arrêt du retraitement, reflètent les incertitudes de manière plus réaliste. Ils indiquent que les combustibles usés constitueraient la majeure partie des déchets hautement radioactifs. En outre, les combustibles MOX usés, dont la charge thermique et la composition isotopique sont plus difficiles à gérer, devraient également être stockés.

Pour conclure, le scénario S1 qui comprend les six réacteurs EPR2 reste très incomplet (tout comme l'inventaire de référence et l'inventaire de réserve). Les scénarii S2, S3 et S4 sont plus réalistes.

c. Les termes sources fondés sur la politique actuelle (2025)

Nous proposons que deux inventaires de termes sources soient établis pour répondre à la nécessité d'avoir un terme source définitif (une des recommandations de l'IEER en 2011 ; voir le chapitre II ci-dessus). Nous proposons aussi qu'un troisième inventaire soit établi afin de fournir aux décideurs politiques les informations concernant la capacité du site. Ils pourront ainsi prendre en compte des conséquences pour la gestion des déchets qui découleront de leurs décisions en matière de politique énergétique nucléaire. Ce troisième inventaire est également essentiel pour les habitants de la région

²Par exemple, en supposant que la concentration initiale en U 235 est de 0,3%, environ 25,7 kilogrammes d'uranium appauvri seraient nécessaires pour obtenir 1 kilogramme d'uranium enrichi à 4% U 235. Le reste, 24,7 kilogrammes, serait encore plus appauvri en U 235 (0,15% dans cet exemple). Voir aussi ASN 2020, p. 7.

Meuse-Haute Marne, compte tenu des engagements qui leur ont été faits lors de la définition de la zone de transposition et de la ZIRA.

Comme indiqué ci-dessus, l'inventaire de référence et l'inventaire de réserve sont incomplets. Plus précisément, le premier n'inclut pas toutes les installations nucléaires qui seront nécessaires pour atteindre l'objectif déclaré de zéro plutonium séparé résiduel et zéro combustible MOX usé non-retraité. Le second comporte la même lacune et ne correspond pas à la politique nucléaire actuelle.

L'Andra n'est bien sûr pas responsable des décisions en matière de politique énergétique. Cependant, le terme source dépend de la politique énergétique nucléaire. À son tour, l'évaluation de la performance dépend du terme source et est une étape nécessaire pour obtenir l'autorisation de procéder à la construction de Cigéo. Par conséquent, l'Andra est tenue de fixer un terme source dans les délais impartis. Les deux inventaires de la DAC sont obsolètes et devraient être révisés afin de refléter la situation de 2025. *À la lumière de cela, nous proposons que l'ANDRA établisse deux termes sources et procède à une évaluation des performances pour chacun d'eux, qui servira de base à une révision de la DAC (voir le chapitre I).* Tous les scénarii incluraient les déchets provenant des réacteurs à graphite et des installations du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), comme le suppose déjà l'Andra.

i. Scénario « utilisation complète du plutonium »

Ce terme source serait un scénario SR1 élargi. Il inclurait les déchets HA et MA-VL provenant de

- 14 réacteurs EPR2 d'une durée de vie de 60 ans ;
- tous les réacteurs, y compris les réacteurs à neutrons rapides, nécessaires à l'élimination complète de tout le plutonium produit au cours de l'exploitation du parc de réacteurs existant (y compris l'EPR de Flamanville) pendant 60 ans et des 14 réacteurs EPR2.
- toutes les nouvelles installations de retraitement nécessaires et toutes les modifications des installations de retraitement existantes nécessaires pour accomplir la conversion du plutonium récupéré à partir du combustible MOX usé en combustible MOX de deuxième génération.
- l'américium 241 extrait du plutonium séparé vieilli afin que ce dernier puisse être transformé en combustible MOX (voir la section IV.5 ci-dessous).
- le démantèlement de toutes les installations susmentionnées (en plus du parc de réacteurs existant).

ii. La politique nucléaire actuelle avec un retraitement limité (scénario « retraitement limité »)

L'Andra a développé un scénario « enveloppe SNR » comme variante de son inventaire de réserve. Ce scénario prévoyait un retraitement limité et, par conséquent, prévoyait le stockage direct du combustible usé. Nous proposons un scénario fondé sur la même approche, mais en accord avec l'état actuel de la politique énergétique nucléaire. Il comprendrait :

- 14 réacteurs EPR2, d'une durée de vie de 60 ans ;
- le parc nucléaire actuel, y compris l'EPR de Flamanville d'une durée de vie de 60 ans.
- le retraitement du combustible usé « UNE » (Uranium naturel enrichi) jusqu'à 2040, date à laquelle La Hague devrait fermer (comme dans les scénarii S3 et S4 de l'Andra – voir le tableau IV-4 ci-dessus) ;
- le stockage direct de tous les combustibles usés à l'uranium enrichi non retraités en 2050 et de tous les combustibles usés MOX dans les alvéoles horizontales de la même taille que celles prévues pour les déchets HA1 et HA2 (voir la section IV.6 ci-dessous).

- le stockage direct du plutonium vieilli qui, autrement, nécessiterait une séparation de l'américium 241 (voir la section IV.5 ci-dessous).
- les déchets MA-VL provenant du démantèlement des installations mentionnées ci-dessus.

Ce scénario n'envisage aucun réacteur à neutrons rapides.

iii. Scénario définissant la capacité maximale du site

Compte tenu de ces incertitudes qui pèsent sur la politique future en matière d'énergie nucléaire, il est important de s'interroger sur les quantités maximales de HA-VL et MA-VL que Cigéo pourrait accueillir. Cette question relève pleinement de la mission de l'Andra.

L'IEER a soulevé la question de la capacité de Cigéo dans sa correspondance avec l'Andra : « Quel est le volume maximal de HA-VL et MA-VL que la totalité de la zone autorisée pourrait accueillir ? » L'Andra a répondu que de nombreux facteurs, tels que la charge thermique et la poursuite ou l'arrêt du retraitement, auraient un impact sur la quantité totale pouvant être stockée (Andra Réponse 2024). Les réponses spécifiques de l'Andra doivent être considérées dans le contexte de la délimitation de la zone souterraine, appelée « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (ZIRA), choisie par l'Andra en 2009 pour l'étude détaillée du stockage des HA-VL et MA-VL. Outre les critères géologiques, la ZIRA retenue excluait le laboratoire souterrain ainsi que les communes habitées. La ZIRA est la projection en surface de la zone géologique qui serait désignée pour le stockage des déchets, appelée « zone d'implantation des ouvrages souterrains » ou ZIOS.

La carte fournie par l'Andra est reproduite à la figure IV-1



Figure IV-1 : Carte montrant la zone de transposition et la « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (ZIRA).

Source : Andra 2024b

L'Andra a fourni des estimations spécifiques relatives à la superficie de la zone de stockage qui serait nécessaire pour l'inventaire de référence et les deux scénarii développés pour l'inventaire de réserve (voir le tableau IV-3 ci-dessus). La zone de la ZIRA s'étend sur environ 30 km². L'Andra a fourni les estimations suivantes concernant la zone de stockage nécessaire dans le cadre de ces scénarii (Andra 2024b) :

- **inventaire de référence** : environ 15 km² seraient nécessaires pour l'inventaire de référence, dont environ 9 km² pour la zone de stockage HA, ce qui implique qu'environ 6 km² seraient nécessaires pour le stockage MA-VL.
- **inventaire de réserve, scénario SR1** : environ les deux tiers de la ZIRA seraient nécessaires, dont 10 km² pour le stockage de HA.
- **inventaire de réserve, scénario SNR « enveloppe »** : dans ce scénario, le retraitement s'arrêterait, ce qui réduirait le volume des déchets HA-VL mais nécessiterait le stockage direct du combustible usé sans retraitement. Surface requise : « une superficie totale du stockage *environ du double de celle du quartier HA pour l'inventaire de référence*) au niveau des quartiers HA/CU. » (C'est nous qui le soulignons). Cela se traduit par une surface d'environ 18 km² pour le stockage des déchets HA et combustibles usés dans le scénario SNR enveloppe. La surface nécessaire pour les déchets MA-VL serait légèrement inférieure à celle de l'inventaire de référence (voir le tableau IV-2 ci-dessus). En supposant que cela nécessiterait environ 5 km², la surface totale nécessaire pour le scénario SNR enveloppe serait d'environ 23 km². Cela représente près de 70 % de la surface disponible dans la ZIRA.

Une forte relance de l'énergie nucléaire accompagnée d'un arrêt du retraitement pourrait avoir pour conséquence d'augmenter la surface nécessaire pour le stockage jusqu'à la limite de la ZIOS actuelle, voire plus. Dans sa réponse aux questions de l'IEER, l'Andra a noté que « Intrinsèquement, la ZIOS étant finie, sa capacité d'accueil ne peut pas être infinie. » (Andra 2024b). Cependant, l'Andra n'a pas spécifié de limite pour les quantités cumulées de déchets HA-VL et de déchets MA-VL que le site pourrait accueillir. Une fois que les différents paramètres qui permettent de faire varier la densité du stockage sont pris en compte, l'Andra précise qu'« *il est important de souligner que la ZIOS ne représente pas une frontière en termes de faisabilité du stockage.* » (Andra 2024b).

Il nous semble que l'obligation faite à l'Andra d'étudier l'adaptabilité du site à d'éventuelles variations de la politique en matière d'énergie nucléaire exige une réponse plus précise. La zone de transposition, d'une superficie d'environ 250 km², a été sélectionnée en 2005 en se fondant sur des critères géologiques. Des critères plus stricts ont été imposés en 2009 à la suite d'études approfondies. L'IRSN a décrit les critères particulièrement pertinents qui ont été utilisés pour délimiter la ZIRA à l'intérieur de la zone de transposition (IRSN 2009, pp. 3-4) :

« Le choix de la ZIRA retenue repose sur les résultats des travaux de reconnaissance examinés ci-avant, destinés à confirmer les caractéristiques géologiques favorables de la zone de transposition pour accueillir un stockage de déchets HA-MAVL, mais également sur l'identification, au sein de la zone de transposition, d'une superficie délimitant des terrains présentant des caractéristiques considérées comme plus particulièrement propices à l'implantation du futur stockage, en l'occurrence : »

- « 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, »

- « la possibilité d'implanter les infrastructures souterraines perpendiculairement au pendage de la couche hôte, »
- « une épaisseur réduite de couches karstiques (Barrois) à traverser pour établir les liaisons jour-fond (puits ou descenderie). »

L'IRSN a spécifiquement décrit les façons dont la roche hôte sous la ZIRA, maintenant appelée ZIOS, répondait à des critères géologiques plus stricts que les caractéristiques de la roche hôte sous la zone de transposition beaucoup plus vaste. Nous citons ici longuement le rapport de l'IRSN, car il est au cœur de l'une de nos recommandations concernant le travail que l'Andra doit effectuer pour définir le potentiel terme source qui pourrait être accueilli sur le site. L'IRSN a noté que (IRSN 2009, p. 4) :

- « l'Andra privilégie une zone au sein de laquelle l'épaisseur de la couche hôte est plus importante que l'épaisseur minimale retenue pour définir la zone de transposition ; »
- « la ZIRA est effectivement située dans une zone à très faible gradient de charge hydraulique ; »
- « la valeur du pendage de la formation hôte, bien que relativement élevée dans l'emprise de la ZIRA en comparaison de celles estimées dans la zone de transposition, reste néanmoins suffisamment faible (de l'ordre de 2 %) pour permettre la construction d'ouvrages souterrains orientés préférentiellement dans le sens perpendiculaire au pendage de la couche du Callovo-Oxfordien ; »
- « la formation karstifiée du Barrois présente en certains endroits où pourraient être implantées les installations de surface une épaisseur faible (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) qui devrait permettre de minimiser les risques de venues d'eau dans les liaisons jour-fond à la traversée de cette formation. En outre, la reconnaissance préalable des poches karstiques les plus importantes, par exemple au moyen de profils de résistivité électrique ou de forages à l'avancement, reste également pour l'IRSN un moyen de prévenir le risque d'inondation lié à ces poches lors du creusement. »

L'IRSN a également noté que la zone de la roche hôte de la ZIRA a été choisie pour être relativement peu profonde (dans le cadre des exigences globales du stockage profond) « afin de réduire les perturbations mécaniques pouvant être occasionnées par le creusement des ouvrages à une trop grande profondeur. » (IRSN 2009, p. 4).

Des critères socio-économiques ont également été pris en compte dans la sélection de la ZIRA. En 2009, l'Andra a utilisé des critères géologiques pour réduire la zone de stockage potentielle de la zone de transposition de 250 km² à 100 km². Les critères socio-économiques, établis en consultation avec les communautés de la région, ont permis de réduire cette zone à 30 km². La ZIRA excluait des agglomérations ; par conséquent, il n'y a aucune habitation au-dessus de la ZIOS. Mais il y en a quatre à proximité immédiate de la ZIRA, juste à l'extérieur : Bure, Mandres-En-Barrois, Bonnet et Ribeaucourt. Voir la carte de la figure IV-2.

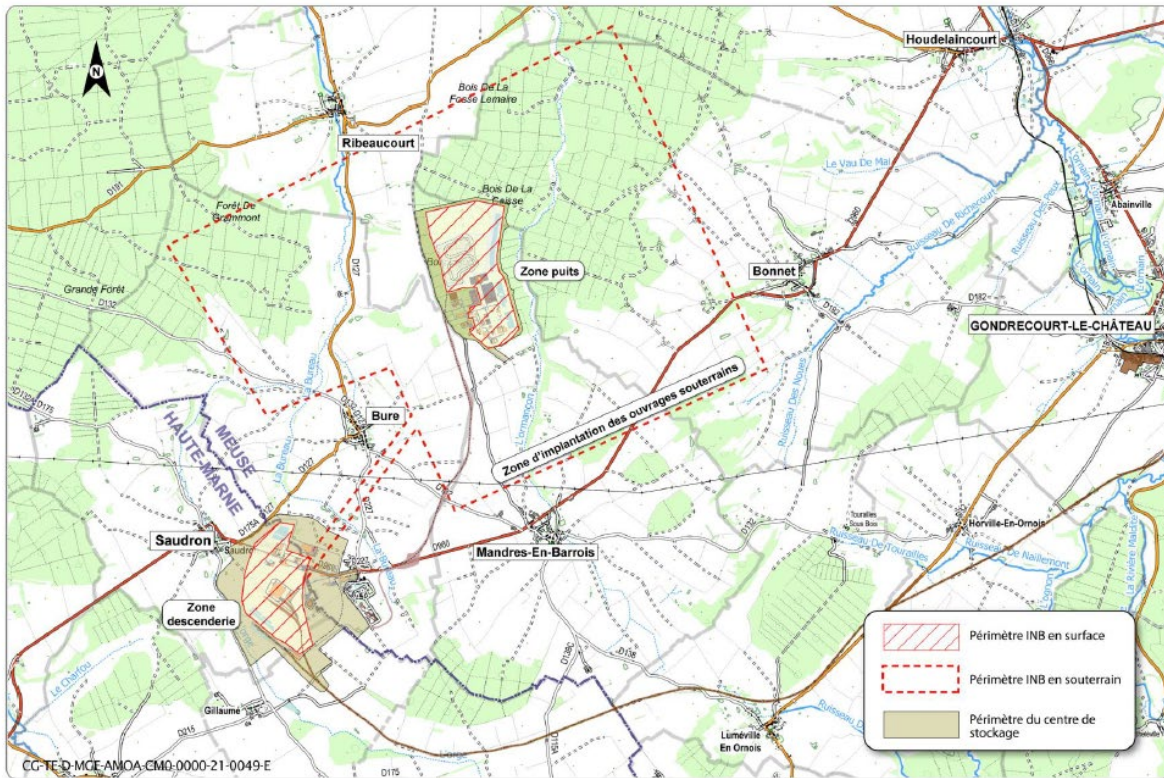


Figure IV-2 : « Illustration de l'implantation de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo (identifiée par les périmètres INB en surface et en souterrain) » (Andra Pièce 16 2022, Figure2-4)

L'Andra a déclaré que le stockage pourrait ne pas se limiter à la ZIOS, dont la ZIRA est la projection en surface (Andra 2024b). Cependant, elle n'a pas indiqué quelle étendue supplémentaire hors de la ZIRA pourrait répondre à tous les critères géologiques et socio-économiques convenus avec les communautés de la région en 2009. Elle n'a pas non plus précisé à partir de quel degré d'expansion de la ZIOS de nouvelles installations de surface pourraient être nécessaires.

5. Matières radioactives actuellement non classées comme déchets

Un certain nombre de matières radioactives sont, pour l'heure, considérées comme ayant un potentiel d'utilisation et ne sont donc pas classées comme déchets. Nous examinons ici les circonstances et les implications pour le stockage en profondeur dans l'éventualité d'un changement de catégorie de « matière radioactive » en « déchet radioactif ». Les orientations générales émises par l'ASN pour la requalification des matières ayant le statut de « matières radioactives » à usages potentiels en déchets radioactifs étaient les suivantes (ASN 2020, pp. 5-6) :

« L'ASN estime que la valorisation d'une matière radioactive peut être considérée comme plausible si l'existence d'une filière industrielle est réaliste à un horizon d'une trentaine d'années.

« Pour toute perspective plus lointaine, il est nécessaire d'anticiper les besoins d'entreposage sur les durées correspondantes, plus longues qu'une trentaine d'années,

dans des conditions sûres, et la gestion possible de la substance radioactive en tant que déchet.

« En tout état de cause, l'absence de perspective d'utilisation à l'horizon d'une centaine d'années doit conduire à requalifier la substance en déchet. »

a. Le plutonium séparé et l'américium 241

Fin 2022, le stock de plutonium séparé en France s'élevait à 70 tonnes. Malgré son utilisation comme combustible MOX, le stock a augmenté de cinq tonnes en une seule année, entre 2021 et 2022 (Andra 2024, p. 16). La relance potentielle du secteur nucléaire et la construction d'un ou de plusieurs réacteurs à neutrons rapides atténueraient ou (peut-être) résoudraient potentiellement le problème de l'utilisation du plutonium.

Cependant, deux problèmes subsistent. D'abord, le plutonium récupéré lors du retraitement du combustible utilisé MOX est de composition isotopique dégradée. Les questions de sécurité et de coût liées à l'utilisation de ce plutonium dépassent le cadre de ce rapport. Néanmoins, nous soulignons ici certaines questions soulevées par l'ASN en 2020. Celle-ci a noté que le recyclage du plutonium issu du retraitement du MOX dans les réacteurs à neutrons thermiques - c'est-à-dire l'ensemble du parc nucléaire actuel - « soulève des questions inédites relatives au vieillissement des cuves, en raison des concentrations plus importantes en plutonium introduites dans le cœur des réacteurs ; que l'utilisation de ces assemblages combustibles conduirait de plus à augmenter la production globale d'actinides mineurs par rapport au « cycle du combustible » actuel. » (ASN 2020, p. 10). L'éventualité que le plutonium issu du retraitement des combustibles MOX ne soit pas utilisable de manière sûre ou rentable, notamment en l'absence de réacteurs à neutrons rapides, doit être prise en compte dans l'inventaire de réserve. Le mélange d'isotopes émetteurs alpha dans le plutonium séparé et de l'américium 241 issu du plutonium 241 (lorsqu'essentiellement tout le plutonium 241 a disparu)³ a une activité spécifique supérieure à 20 GBq/g, bien supérieure à la limite inférieure pour les HA-VL de 1 GBq/g (voir le tableau IV-1 ci-dessus).

Un deuxième problème concerne l'âge du plutonium récupéré. Le combustible utilisé des REP avec un taux de combustion de 40 MWj/kilogramme de métal lourd contient environ 14 % de plutonium 241 (Mark 2009, Figure 1). Le plutonium 241 a une demi-vie relativement courte de 14,4 ans ; il se désintègre en américium 241, qui a une demi-vie de 432,2 ans et une activité spécifique d'environ 130 milliards Bq/g. Ce dernier appartient donc à la catégorie des déchets HA (tableau IV-1 ci-dessus). Le tableau IV-4 indique la quantité d'américium 241 par tonne de plutonium retraité dans un réacteur à eau pressurisée et stocké pendant des périodes de 5, 10, 15 ou 20 ans. Nous avons pris comme hypothèse que le retraitement a lieu cinq ans après le déchargement du combustible utilisé. À ce moment-là, un peu plus de 20 % du plutonium 241 se serait désintégré en américium 241. Cet américium serait séparé du plutonium au moment du retraitement. Le tableau IV-4 montre l'accumulation d'américium 241 dans le plutonium stocké suite au retraitement.

³ Le Pu 241 est un émetteur bêta qui se désintègre en americium-241 avec une demi-vie relativement courte de 14,4 ans.

Tableau IV-4 : Accumulation d'américium 241 au fil du temps dans le plutonium retraité issu des réacteurs à eau pressurisée (taux de combustion : 40 MWj/kg)

	Par tonne de plutonium retraité (Note 1)			
Durée de stockage, années après le retraitement	5	10	15	20
Pu 241 résiduel, g/t Pu	8,65E+04	6,80E+04	5,35E+04	4,20E+04
Am 241, g/t Pu	2,35E+04	4,20E+04	5,66E+04	6,80E+04
Am 241, Bq/t Pu	3,02E+15	5,40E+15	7,27E+15	8,74E+15

Note 1 : Calculé en utilisant 11 % de Plutonium 241 dans le plutonium retraité, en supposant cinq ans de stockage du combustible utilisé avant le retraitement.

Source : Pour la teneur en plutonium 241 du combustible utilisé, Mark 2009. Calculs de l'IEER

L'IEER ne dispose pas de la répartition par âge du plutonium de retraitement entreposé en France. Nous soulignons que l'ASN a fait allusion à cette question dans son examen des questions relatives au statut des matières radioactives et a noté que « l'allongement de la durée d'entreposage du plutonium séparé conduit à une altération de ses caractéristiques en vue de son utilisation dans les réacteurs électronucléaires » (ASN 2020).

Comme le montre clairement le tableau IV-4, l'accumulation d'américium 241 augmente rapidement avec la durée du stockage. Plus le délai d'utilisation du plutonium de retraitement est long, plus son accumulation est importante. Lorsque l'accumulation d'américium 241 devient suffisamment importante pour nécessiter une séparation, le coût du combustible MOX augmente. En outre, des quantités importantes d'américium 241 devront être gérées comme des déchets. Le terme source de l'américium 241 issu du retraitement du plutonium vieilli pour le rendre apte à la fabrication de combustible MOX peut atteindre des dizaines de pétabecquerels ou plus, selon le moment où les stocks de plutonium qui s'accumulent sont utilisés. Nous avons adressé à l'Andra une question concernant un éventuel stockage de l'américium 241 séparé. Nous reproduisons ici la réponse de l'Andra (Andra Réponse 2025) :

« Les échanges menés avec EDF et Orano n'ont pas fait état d'une telle séparation pour la fabrication des combustibles MOX. L'évolution isotopique du plutonium en fonction de sa durée d'entreposage est prise en compte dans les modélisations réalisées par les producteurs afin de déterminer les compositions des combustibles fabriqués sur la base des matières recyclées. »

Dans ses commentaires sur le rapport préliminaire de l'IEER, l'Andra a fait la déclaration suivante concernant un stockage éventuel du plutonium séparé dans Cigéo :

« Au cours de l'instruction du dossier de DAC, l'Andra a pris l'engagement d'étudier la faisabilité du stockage du plutonium séparé. »

L'Andra a également déclaré qu'elle tiendrait compte « de la composition isotopique du plutonium séparé (dont la teneur en américium 241) ... dans le cadre de l'étude ».

Les deux termes sources (scénario d'utilisation complète du plutonium et scénario de retraitement limité) recommandés par l'IEER adressent les questions que l'Andra est tenue d'étudier. Conformément à notre recommandation selon laquelle ces termes sources devraient servir de base à une nouvelle évaluation des performances, l'Andra devrait mener à bien ces études dans le cadre d'une DAC mise à jour.

b. Les autres matières radioactives

Il existe un certain nombre d'autres matières radioactives à longue durée de vie qui ne sont pas, pour l'heure, classées comme déchets car elles pourraient avoir une utilisation, mais, dans certaines circonstances, elles pourraient être requalifiées en déchets radioactifs. Leur activité spécifique est inférieure à celle des MA-VL ; par conséquent, en cas de requalification, elles entreraient dans la catégorie des FA-VL – déchets de faible activité à vie longue. Comme indiqué à la section IV-2 ci-dessus, certains déchets FA-VL sont désormais inclus dans l'inventaire de réserve. Les trois matières appartenant à cette catégorie sont les suivantes :

- l'uranium appauvri ;
- l'uranium récupéré à partir du retraitement du combustible utilisé enrichi ;
- les composés de thorium (matériaux thorifères)

Ces matières n'ont pas d'activité spécifique suffisamment élevée pour être classées comme MA-VL ; cependant, leur activité spécifique augmente avec le temps en raison de l'accumulation de produits de la désintégration radioactive. L'évolution de leur activité spécifique sur plus d'un million d'années, estimée par l'Andra est présentée dans la figure IV-3.

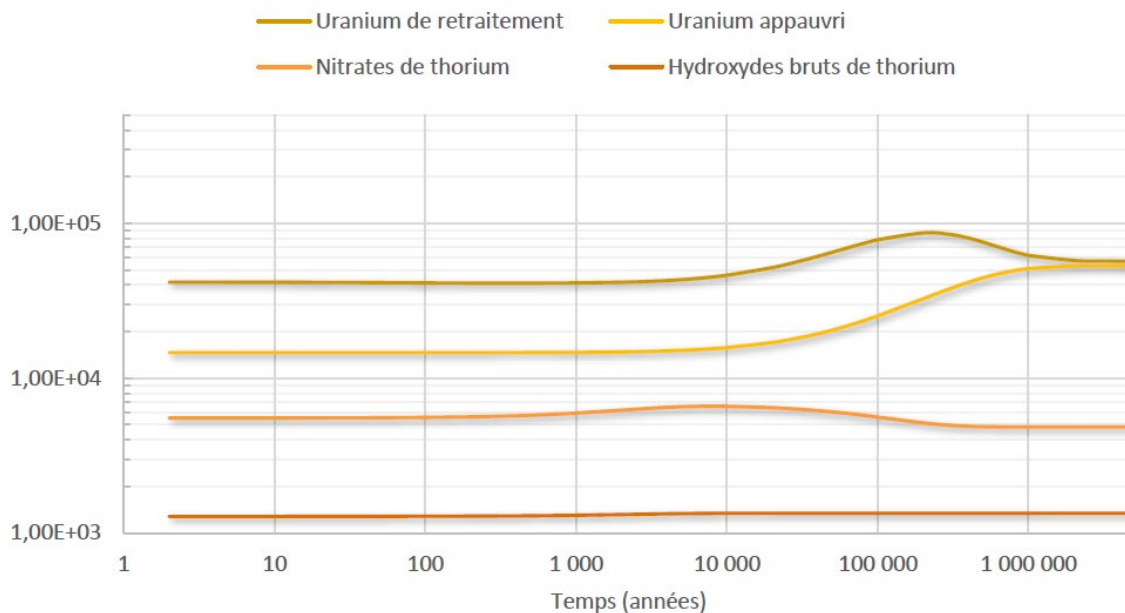


Figure IV-3 : Les activités spécifiques de l'uranium appauvri, de l'uranium retraité et de deux catégories de matières thoriques en Bq/g

Source : Andra 2023, figure 3-5

La matière la plus importante en termes de volume est l'uranium appauvri, dont la quantité continue d'augmenter malgré son utilisation dans plusieurs applications, dont la fabrication de MOX, un fait déjà

noté par l'ASN (ASN 2020, p. 7). Après examen, l'ASN a conclu qu'il était irréaliste de supposer que le stock d'uranium appauvri serait consommé sur une échelle de temps d'un siècle. En conséquence, l'ASN a émis l'avis suivant (ASN 2020, p. 7) :

« En conséquence, l'ASN estime indispensable qu'une quantité substantielle d'uranium appauvri soit requalifiée, dès à présent, en déchet radioactif. Dans cette perspective, l'Andra doit poursuivre, en lien avec Orano, les études visant au stockage de l'uranium appauvri. »

Un avis similaire s'appliquerait également à l'uranium retraités (URT) et aux matières thorifères. L'ASN a indiqué que les matières thorifères sont similaires à l'uranium appauvri en ce sens que la valorisation des quantités stockées est improbable. La quantité de matières thorifères est cependant bien moindre que celle d'uranium appauvri – elle n'est que de 8 515 tonnes environ. L'ASN a conclu que la valorisation du thorium semble peu plausible (ASN 2020, p. 13).

Fin 2022, la France disposait d'un stock de 34 600 tonnes d'URT, lequel a augmenté de 400 tonnes en un an, de 2021 à 2022 (Andra 2024, p. 16). Une partie de l'URT français a été ré-enrichi en Russie, pour être fabriqué en combustible nucléaire pour les centrales françaises. L'URT pourrait être ré-enrichi en France et utilisé comme combustible nucléaire. Cependant, l'URT contient des traces de radionucléides transuraniens, en particulier du plutonium et du neptunium. Ces derniers contamineraient les usines d'enrichissement, compliquant leur fonctionnement et éventuellement leur démantèlement. Le ré-enrichissement de l'URT n'a pas encore été effectué en France. Il faudra probablement envisager de construire une nouvelle usine spécifiquement dédiée au ré-enrichissement de l'URT (Mouterde 2024 et Mouterde et Cessac 2022). Concernant la réutilisation potentielle de l'URT, les projets de relance de l'énergie nucléaire pourraient adresser quelque peu les préoccupations soulevées par l'ASN. Quant aux problèmes associés au ré-enrichissement, ils resteront à traiter, il sera donc possible que l'URT fasse l'objet d'un stockage.

Conformément à l'avis de l'ASN, l'Andra a réalisé une étude explorant les options de stockage pour trois de ces matières radioactives à longue durée de vie (ANDRA 2023). Les études d'options portent sur le stockage à profondeur intermédiaire, conformément aux recommandations de l'ASN fournies en 2008. Les considérations relatives aux déchets FA-VL dont l'activité spécifique ne diminue pas sur des dizaines de milliers d'années étaient les suivantes (ASN 2008, p. 4, c'est nous qui soulignons) :

« Aussi, une installation de stockage de déchets FA VL devra être en cohérence avec la plupart des objectifs généraux et des principes de sûreté à long terme retenus pour le stockage de déchets de moyenne et haute activité à vie longue (MA-VL/HA) en couche géologique profonde. Une installation de stockage de déchets FA VL devrait néanmoins présenter des différences majeures de conception par rapport à une installation de stockage géologique profonde du fait de la faible activité des déchets stockés en comparaison de l'activité des déchets MA-VL/HA. Il appartiendra au concepteur de préciser les exigences qu'il associe aux dispositifs mis en œuvre pour assurer la sûreté du stockage des déchets FA VL en fonction des résultats de son analyse de sûreté. Il apparaît toutefois que les principales différences porteront sur la profondeur et les performances dans la durée du milieu géologique, les performances des colis et les dispositions de conception visant à assurer la sûreté de l'exploitation de l'installation. Par ailleurs, comme pour les stockages de surface, il sera nécessaire de limiter la

radioactivité à vie longue pouvant être reçue dans l'installation, *notamment pour les radionucléides qui ne décroissent pas en quelques dizaines de milliers d'années*, et, le cas échéant, d'examiner l'opportunité de fixer des règles de répartition de l'activité au sein de l'installation afin de limiter l'apparition de zones d'activité concentrée lorsque le stockage ne sera plus à l'abri des intrusions humaines banales. Les limitations d'activité seront donc des éléments fondamentaux pour définir les catégories de déchets susceptibles d'être acceptées dans un stockage de déchets FA-VL, au vu du site et du concept retenus. »

Ce raisonnement a conduit l'ASN à conclure que « Le stockage des déchets FAVL est donc une installation « intermédiaire » entre un centre de stockage de surface et un centre de stockage en formation géologique profonde... ». Ce type de stockage serait donc conforme à la loi et aux principes énoncés. C'est l'approche adoptée dans Andra 2023.

Il convient toutefois de noter que l'uranium appauvri et l'uranium retraité n'étaient pas encore considérés comme des déchets en 2008 lorsque l'ASN a rendu son avis ; en fait, ils ne sont toujours pas officiellement classés comme tels. La radioactivité totale des déchets FA-VL actuellement classés comme déchets et qui ne figurent pas dans l'inventaire de réserve est relativement faible. Toutefois, cela ne serait pas le cas si l'uranium appauvri et, dans une moindre mesure, l'uranium retraité étaient classés comme déchets. La radioactivité des déchets HA diminue de plusieurs ordres de grandeur au cours des 1 000 premières années et continue de diminuer par la suite. En revanche, l'activité spécifique des deux types d'uranium augmente avec le temps. En conséquence, l'activité totale d'un demi-million de tonnes d'uranium appauvri (une estimation approximative de la quantité probable de déchets) s'élèvera à ~25 millions de gigabecquerels après environ un million d'années. À long terme, cette quantité pourrait atteindre un niveau comparable ou supérieur à celui des déchets HA sur une période d'un million d'années. Les déchets d'uranium retraité poseraient des problèmes similaires, bien que leur quantité soit de l'ordre de dix fois inférieure à celle de l'uranium appauvri.

Il convient également de noter que les radionucléides à longue durée de vie dont il est question sont tous essentiellement des émetteurs alpha, dont les risques pour l'environnement et la santé pourraient être considérables s'ils pénétraient dans l'environnement humain. Il semble donc important de revoir la conclusion de l'ASN selon laquelle un stockage à profondeur intermédiaire serait approprié si ces deux catégories d'uranium étaient reclassées comme déchets FA-VL. Cette réalité pousse à la conclusion que l'uranium retraité et l'uranium appauvri fassent l'objet d'un examen plus approfondi. La perspective à très long terme de la croissance de la radioactivité semble pointer vers un stockage géologique profond, que ce soit dans l'INB Cigéo ou ailleurs. Il est impératif que cette question soit examinée dans un avenir proche afin que les décideurs politiques et le public puissent mieux comprendre les implications potentielles pour l'INB Cigéo.

6. Commentaires sur les préoccupations relatives au terme source de l'IEER 2011

Une des préoccupations principales concernant le terme source dans le rapport 2011 de l'IEER était l'absence de considérations relatives au stockage, le cas échéant, du combustible utilisé non retraité. À cet égard, l'IEER avait souligné que les colis de déchets de combustible utilisé avaient un diamètre beaucoup plus grand (3,3 mètres) que les colis HA-VL de produits de fission vitrifiés (70 cm de diamètre). Le risque

d'importantes fractures dans la roche hôte en raison du grand diamètre des colis était une préoccupation majeure.

Ces problèmes semblent avoir été résolus. En premier lieu, le scénario SNR enveloppe prend en compte explicitement le stockage du combustible usé. Ensuite, l'Andra a informé l'IEER, lors d'une réunion concernant cette évaluation, que les colis de combustible usé auraient un diamètre comparable à celui des colis HA-VL, étant donné qu'une seule grappe de combustible usé serait chargée dans chacun d'entre eux. L'utilisation de colis de 3,3 mètres de diamètre semble donc être exclue.

L'Andra a donc répondu de manière satisfaisante aux principales préoccupations de 2011 de l'IEER en ce qui concerne le stockage du combustible usé si le constat fait par l'Andra concernant la taille des colis pour le stockage de CU venait à être officialisé dans les programmes pour le scénario SNR « enveloppe ».

L'autre préoccupation en 2011 concernait le développement d'un terme source définitif. Cette préoccupation est discutée en détail ci-dessus.

7. Conclusions et recommandations concernant le terme source

a. Conclusions

1. Les termes sources figurant dans l'inventaire de référence et l'inventaire de réserve ne représentent pas le terme source définitif que la DAC devrait avoir et qui avait été recommandé par l'IEER en 2011. Un terme source de cette nature est nécessaire pour estimer la capacité du site à accueillir les déchets et pour évaluer la performance du site après sa fermeture.
2. La sûreté et le coût de l'utilisation du plutonium qui a été stocké pendant de longues années (et qui peut nécessiter un traitement avant de pouvoir être utilisé) et l'utilisation du plutonium récupéré lors du retraitement du combustible MOX posent des défis spécifiques. Si ces matières ne sont pas valorisées dans leur totalité, leur reclassement comme déchets pourrait considérablement augmenter le terme source. En outre, vu la complexité et le coût de l'utilisation du plutonium issu du MOX usé, il est tout à fait possible qu'il faille stocker ce combustible usé sans retraitement.
3. Les politiques et propositions qui visent à relancer l'énergie nucléaire en France font état de 14 nouveaux réacteurs de type EPR2 et potentiellement d'un certain nombre de SMRs ; aucun de ces réacteurs ne fait partie de l'inventaire de réserve. En commentant le rapport préliminaire de l'IEER, l'Andra a déclaré : « Dans sa mise à jour de l'inventaire de réserve, l'Andra inclut les déchets générés par les 6 premiers EPR2. Les déchets générés par les éventuels EPR2 suivants ne sont pas inclus à ce stade. »
4. Il est possible que dans certains scénarios de l'énergie nucléaire (arrêt du retraitement, construction de 14 EPRs et de SMRs, stockage d'une partie de l'uranium appauvri...) la capacité de l'INB Cigéo, telle que définie par la ZIOS (dont la projection en surface est la ZIRA), ne suffira pas. L'Andra a indiqué que le stockage pourrait s'étendre au-delà. Mais elle n'a pas précisé la superficie de cette extension potentielle, tout en reconnaissant que le site étant fini, sa capacité ne peut être infinie.
5. Il semblerait que l'Andra n'ait pas encore envisagé la possibilité du stockage de l'américium 241 séparé du plutonium qui a été entreposé pendant de longues périodes avant que ce dernier puisse être fabriqué en combustible MOX. L'Andra a informé l'IEER que cette question est à l'étude.

6. Si une partie du plutonium récupéré des combustibles MOX et/ou du retraitement des combustibles usés à l'uranium naturel n'est pas utilisée pour des raisons techniques ou économiques, elle viendra s'ajouter au terme source de l'INB Cigéo. L'Andra a informé l'IEER que cette question est également à l'étude.

b. Recommandations

1. Pour démontrer sa capacité d'adaptation, l'inventaire de réserve devrait inclure les projets de construction de 14 réacteurs de type EPR2 et leur fonctionnement pendant 60 ans. L'IEER recommande le développement de deux termes source qui devraient servir de base à l'évaluation de la performance du site, comme décrit dans les sections IV.4.c.i et IV.4.c.ii ci-dessus :

- Un scénario d'utilisation de tout le plutonium.
- Un scénario de retraitement limité.

2. L'Andra devrait préciser la capacité du site à accueillir les déchets, en tenant compte des facteurs géologiques ainsi que des facteurs socio-économiques – voir la section IV.4.c.iii ci-dessus.

3. L'Andra a publié un rapport sur les options de stockage à profondeur intermédiaire pour l'uranium appauvri et l'uranium retraité. Vu la croissance de leur radioactivité sur le long terme et les grandes quantités d'uranium appauvri et d'URT, il est essentiel qu'elle examine de plus près le stockage géologique profond de ces deux matières. Cela devrait être fait dans un avenir proche afin que l, le cas échéant les décideurs politiques et le public puissent mieux comprendre les implications potentielles pour l'INB Cigéo.

8. Références

Andra Réponse 2025. DAC CIGEO – Réponse [sic] aux questions IEER 2025-03-12.

Andra Réponse 2024. DAC CIGEO – Réponse [sic] aux questions IEER 2024-10-29.

Andra 2024. *L'Inventaire national des matières et déchets radioactifs : Les essentiels 2024*.

Andra 2024a. *L'Inventaire national des matières et déchets radioactifs : Présentation ANDRA CA CLIS*. 10 juin.

Andra 2024b. DAC CIGEO – Réponse [sic] aux questions IEER- 29 octobre 2024, deuxième version envoyée à l'IEER le 26 décembre 2024.

Andra 2024c. *L'Inventaire national des matières et déchets radioactifs : Catalogue descriptif 2024*.

Andra 2023. PNGMDR 2022-26 : Définition des scénarios de stockage de l'uranium appauvri, de l'uranium de retraitement et des matières thorifères. Décembre.

Andra Inventaire 2022. Dossier d'Autorisation de Création d'une Installation Nucléaire de Base (INB) Cigéo - Justification des Données d'Entrée (Colis) : Inventaire de Réserve. Décembre.

Andra Pièce 7 Vol. 1 2022. Dossier d'Autorisation de Création d'une Installation Nucléaire de Base : Pièce 7 - Version Préliminaire du rapport de sûreté, Partie I : Contexte, périmètres, démarche et référentiels ;

Volume 1 : Le contexte, le périmètre et la structure de la version préliminaire du rapport de sûreté. Décembre.

Andra Pièce 16 2022. Dossier d'Autorisation de Création d'une Installation Nucléaire de Base : Pièce 16 : Plan directeur d'exploitation. Décembre.

Andra Socle 2022. Le socle de connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo : Recueil des fiches bilan scientifiques et techniques, CG-TE-D-LST-AMOA-TRO-0000-20-0001/A, Décembre.

Andra 2019. Contenu des études relatives à l'adaptabilité de Cigéo au stockage des déchets de l'inventaire de réserve, CG-TE-D-NTE-AMOA-SRO-0000-19-0011. Juillet.

ASN 2020. Avis n° 2020-AV-0363 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 8 octobre 2020 sur les études concernant la gestion des matières radioactives et l'évaluation de leur caractère valorisable 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, Autorité de Sûreté Nucléaire, ASN Avis n° 2020-AV-0363, 8 octobre.

ASN 2008. Orientations générales de sûreté en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité à vie longue, version du 5 mai 2008.

Comité Local d'Information et de Suivi. 2024 (CLIS 2024). Mission d'assistance auprès de la commission « Risques » du CLIS dans le cadre de l'instruction de la DAC : Cahier des Clauses Techniques Particulières.

IEER 2004. *Examen critique du programme de recherche de l'ANDRA pour déterminer l'aptitude du site de Bure au confinement géologique des déchets à haute activité et à vie longue : Rapport final*, préparé pour le Comité Local d'Information et de Suivi du Laboratoire de Bure (CLIS) ; coordinatrice : Annie Makhijani ; auteurs : Detlef Appel, Jaak Daemen, George Danko, Yuri Dublyansky, Rod Ewing, Gerhard Jentzsch, Horst Letz, Arjun Makhijani, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, Maryland, décembre.

IEER 2011. *Examen critique du programme de l'Andra sur les recherches effectuées dans le laboratoire souterrain de Bure et sur la zone de transposition pour définir une ZIRA : Rapport final*, préparé pour le Comité local d'information et de suivi du laboratoire de Bure (CLIS) ; coordinatrice : Annie Makhijani ; auteurs : Jaak Daemen, George Danko, Gerhard Jentzsch, Elena Kalinina, Arjun Makhijani et Krishan Wahi. Institut de recherche sur l'énergie et l'environnement, Takoma Park, Maryland, avec corrections du 20 avril.

IRSN 2024. Demande d'Autorisation de Création du Projet Cigéo « GP1 » -- Évaluation des Données de Base Retenues pour l'Évaluation de Sûreté – Annexes, Rapport IRSN N° 2024-00212, 12 avril.

IRSN 2013. La gestion des déchets radioactifs : Collecter, trier, traiter, conditionner, entreposer et finalement stocker pour se protéger. https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/2023-03/irsn_livret_dechets_radioactifs.pdf

IRSN 2009. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. *Avis de l'IRSN sur les critères retenus par l'Andra pour le choix d'une « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » en vue du projet HA-MAVL - Site de Meuse/Haute-Marne*, Lettre IRSN/2009-166, Fontenay-aux-Roses : IRSN, 22 décembre. http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/Avis_IRSN_ZIRA_22122009.pdf

P.O. Box 5324, Takoma Park, MD 20913. Phone 301-509-6843. Website: www.ieer.org

Mark, Carson. 2009. « Explosive properties of reactor grade plutonium », *Science and Global Security*, Vol. 17, 2009. <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs17mark.pdf>

Mouterde, Perrine. 2024. « Nucléaire : le gouvernement envisage de construire une usine de conversion de l'uranium de retraitement en France. » *Le Monde*. 28 mars.

https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/03/28/nucleaire-le-gouvernement-envisage-de-construire-une-usine-de-conversion-de-l-uranium-de-retraitement-en-france_6224724_3244.html

Mouterde, Perrine et Marjorie Cessac. 2022. « La Russie possède la seule usine au monde capable de « recycler » l'uranium déchargé des réacteurs nucléaires français : Le groupe français Orano a continué à envoyer jusqu'en octobre de l'uranium en Sibérie, où se trouve une installation de conversion. La guerre en Ukraine pose la question de l'avenir de la filière du retraitement. » *Le Monde*. 29 novembre.

https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/11/29/la-russie-possede-la-seule-usine-au-monde-capable-de-recycler-l-uranium-decharge-des-reacteurs-nucleaires-francais_6152097_3234.html

Nuward 2025. « Nuward SMR : Une solution compétitive pour produire l'électricité bas-carbone, et plus encore, » Nuward 2025. <https://www.nuward.com/fr/notre-smr>

PNGMDR 2022. *Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2022-2026*, Ministère de la transition énergétique.

V. Evaluation des modélisations hydrogéologiques conduites par l'ANDRA, y compris le choix des modèles conceptuels, des paramètres, des conditions aux limites et des scénarii

Auteure principale Sophie Violette

Préambule

Cette analyse s'est appuyée sur une sélection des 22 pièces du Dossier d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (inb) Cigéo (<https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference>) rédigé par l'ANDRA et quelques documents fournis par l'ANDRA à notre demande pour éclairer certains points.

Les documents consultés exposent de façon succincte les travaux réalisés par l'ANDRA et les principales conclusions qui peuvent être émises. Cependant, ces documents :

- 1. sont souvent redondants, les mêmes illustrations et textes associés sont répétés d'une pièce documentaire à l'autre*
- 2. permettent rarement de savoir de manière détaillée comment les résultats présentés dans la DAC ont été obtenus et comment ils ont été validés ou contraints par des données observées*
- 3. présentent des approches méthodologiques qui font rarement référence à des articles ou ouvrages scientifiques*
- 4. exposent des résultats qui ne sont pas publiés ou trop peu publiés dans des revues scientifiques internationales à Comité de lecture, ce qui aurait permis une discussion plus approfondie des résultats obtenus*
- 5. s'appuient sur des références bibliographiques principalement issues de documents rédigés antérieurement par l'ANDRA. Un libre accès à ces documents via un lien internet aurait facilité l'analyse des travaux réalisés par l'ANDRA.*

Synthèse

Synthèse de l'analyse des modélisations hydrogéologiques menées dans le cadre de l'analyse de sûreté pour l'entreposage de déchets issus de l'industrie nucléaire en couche géologique profonde.

Afin d'évaluer l'impact de la construction d'un site d'enfouissement dans des formations géologiques profondes pour les déchets radioactifs de haute activité à vie longue (HA-VL) et les déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL), l'Andra a conduit divers travaux de modélisations numériques hydrogéologiques et géodynamiques qui s'appuient sur les données collectées sur le site et sur les données disponibles dans les bases de données *ad hoc*. Une description des modalités de transfert des radionucléides au sein du Callovo-Oxfordien, de l'Oxfordien et du Dogger est également présentée.

Quatre modèles numériques hydrogéologiques et un modèle géodynamique ont été construits. Chaque modèle a été choisi et construit de façon à répondre à un objectif précis.

Le modèle régional hydrogéologique du bassin de Paris a pour objectif de fournir les conditions aux limites hydrodynamiques au temps présent (année 2000) aux modèles de secteur hydrogéologique et géodynamique. Il a été conçu à l'aide de l'outil numérique à base physique Ground Water, qui simule l'écoulement en milieu saturé en résolvant l'équation de la diffusivité par la méthode des éléments finis. L'emprise géométrique 3D du modèle représente le bassin de Paris *sensu stricto*, soit une extension horizontale de 250 000 km² et verticale de 3,1 km discrétisée en 27 couches. La simulation est conduite en régime permanent à l'équilibre avec les conditions environnementales du temps présent. Les flux de recharge (la part des pluies qui alimente les aquifères) ont été estimés par la méthode du bilan hydrologique à l'échelle de chaque sous-bassin hydrologique. Les rivières et la mer de la Manche sont les principaux exutoires naturels du système multicouche auquel est ajoutée une condition anthropique : le débit annuel pompé dans l'aquifère de l'Albien. La distribution spatiale des conductivités hydrauliques a été obtenue par calage des charges hydrauliques calculées avec celles observées sur les 1255 points de mesure bancarisés qui malheureusement sont diachrones (c.-à-d. les mesures ont été acquises à des dates différentes sur plusieurs décennies). De ce fait, ces données piézométriques ne reflètent pas un état hydrodynamique à l'équilibre avec ses conditions environnementales au temps présent.

Cette modélisation présente plusieurs défauts. Pour rappel, l'intensité des pompages dans l'aquifère de l'Albien a considérablement évolué depuis la découverte de cet aquifère en 1841. Ce débit initialement nul s'est intensifié jusque dans les années 1930 pour atteindre un volume annuel de 35 Mm³/an, et ensuite a été maintenu autour de 18 Mm³/an. En réponse à ce forçage anthropique, le niveau piézométrique a chuté de plus de 100 mètres pour atteindre sa valeur minimale dans les années 1960, avant d'amorcer une lente remontée. L'extension spatiale de ce cône de dépression piézométrique de l'aquifère de l'Albien est d'ampleur régionale et a évolué au cours du temps. Il n'est donc pas possible de calibrer les propriétés hydrodynamiques des formations aquifères et aquitards du bassin de Paris dans un modèle numérique en considérant que le système est à l'équilibre avec ses conditions environnementales (naturelles et anthropiques) au temps présent. En procédant de la sorte, l'effet tampon et transitoire des aquifères dans un système multicouche est sous-estimé. De plus, la calibration des paramètres d'un modèle hydrogéologique en régime permanent en s'appuyant sur des données diachrones n'est pas fondée scientifiquement lorsque les variations piézométriques interannuelles sont aussi importantes. L'aquifère de l'Albien n'est pas le seul à avoir enregistré une baisse significative de son niveau piézométrique (100 m) en réponse aux pompages à l'aplomb de Paris, l'aquifère du Néocomien a enregistré une baisse de son niveau piézométrique de l'ordre de 50 m et l'aquifère du Dogger a enregistré une baisse de l'ordre de quelques mètres. Enfin, le bilan hydrologique de chaque aquifère du modèle n'est pas présenté, alors que c'est l'un des moyens de validation d'une simulation d'un modèle hydrogéologique.

Les deux premiers points soulevés conduisent de facto à une distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques des formations qui est erronée. De ce fait, l'utilisation des résultats de ce modèle pour prescrire des conditions aux limites des modèles de secteur hydrogéologique et géodynamique est infondée scientifiquement.

Le modèle de secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois a pour objectif d'étudier les interactions entre les écoulements de surface et souterrains au temps présent et au cours de la période d'exploitation du site (150 ans) en fonction de différents scénarii climatiques ou d'aménagements du site et de le comparer aux simulations dites « *de référence* ». Il a été conçu avec l'outil numérique à base physique Feflow. Comme le souligne l'Andra, ce modèle n'a pas été en mesure de répondre aux attentes. Le modèle

hydrogéologique des calcaires du Barrois présenté dans la DAC ne permet pas de reproduire le fonctionnement hydrodynamique de cet aquifère complexe. Ce modèle numérique hydrogéologique n'est donc pas fondé scientifiquement. Il apparaît donc indispensable que le modèle conceptuel hydrogéologique soit repensé et puisse s'appuyer sur un jeu de données solide.

Le fonctionnement hydrodynamique des calcaires du Barrois nécessite une étude approfondie qui tienne compte de son évolution : i) à l'état naturel et ii) lors du creusement du laboratoire de recherche souterrain Meuse/Haute-Marne. De cette analyse pourra découler un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de ce système qui pourra ensuite être adapté à un outil de simulation numérique afin d'être en mesure d'évaluer l'impact du creusement des infrastructures du centre de stockage Cigéo sur le fonctionnement de ce système karstique.

En effet, comme le reconnaît l'Andra dans ses commentaires adressés à l'IEER en juin 2025, le modèle Feflow présenté dans la DAC n'est pas satisfaisant et ne répond pas aux objectifs fixés. L'Andra nous a assuré que le développement d'un nouveau modèle capable de reproduire le comportement hydrodynamique karstique des calcaires du Barrois avait été confié au CHYN (Centre hydrogéologique et de géothermie de Neuchâtel) et que ce nouveau modèle s'appuiera sur de nouvelles campagnes de caractérisation du système réalisées par l'ANDRA en collaboration avec le BRGM.

À l'issue de ces travaux, une version révisée de la DAC devra être produite pour intégrer ces nouveaux développements.

Le modèle d'écoulement région-secteur Meuse-Haute-Marne, dit « de référence », a pour objectif de fournir l'état hydrodynamique initial pour le modèle de l'évolution des écoulements sous conditions géodynamiques évolutives (prochain million d'années). Il a été conçu avec l'outil numérique à base physique Ground Water. Il a été calé en régime permanent d'écoulement, les failles et zones de fracturation diffuses ont fait l'objet de tests de sensibilité. Les trajectoires des éléments en solution ont été calculées à l'aide d'un module de type « *particle-tracking* » simulant un transport advectif. Ce modèle multicouche se focalise sur les formations du Dogger, des argilites du Callovo-Oxfordien et de l'Oxfordien calcaire. Ces modèles de prédiction sont établis en régime transitoire sur deux échelles de temps : i) sur le prochain siècle (100 ans) en correspondance avec la période de fonctionnement du futur site de stockage, et ii) sur le prochain million d'années correspondant à l'évolution du site après fermeture.

Le modèle d'écoulement région-secteur Meuse-Haute-Marne (modèle dit « de référence ») au temps présent et les modèles dits « de prédiction » sur un siècle et sur le prochain million d'années s'appuient sur une caractérisation insuffisante des trois principaux aquifères : Calcaire du Barrois, Calcaire de l'Oxfordien et Calcaire du Dogger.

En effet, la confrontation entre les données observées et les résultats de simulation est peu convaincante et nécessite une acquisition complémentaire de données :

- Calcaire du Barrois, de nouveaux piézomètres dans la zone de transposition ZT pour mieux contraindre la carte piézométrique dans les directions du Nord, du Nord-Ouest et de l'Ouest. S'agissant d'un aquifère qui interagit fortement avec le réseau hydrographique, l'étude des débits de base des cours d'eau et des courbes de récession, notamment en périodes sèches, permettra d'obtenir des données complémentaires pour la calibration du modèle hydrogéologique.
- Calcaire de l'Oxfordien, de nouveaux piézomètres dans la zone de fracturation diffuse pour mieux comprendre la relation hydrodynamique entre cet aquifère et le réseau hydrographique, mais également entre cet aquifère et les formations sus et sous-jacentes

- Calcaire du Dogger, la caractérisation des porosités cinématiques, paramètres essentiels du transport en solution en aquifère, doit être recherchée. En effet, en milieu fracturé, les porosités cinématiques peuvent être extrêmement faibles $< 0,001$ et conduisent à des vitesses de pores relativement rapides (cf. : Dassargue, 2020, chapitre 8, encart 8.7 page 260). Explorer la gamme des valeurs de porosité cinématique de ces formations carbonatées est indispensable pour cette démonstration de sûreté.

La comparaison entre les piézométries calculées et observées au cours des deux dernières décennies permettrait de s'assurer de la fiabilité de la calibration du modèle. Une étude de sensibilité du modèle aux paramètres de la conductivité hydraulique, du coefficient d'emménagement et de la porosité cinématique est nécessaire. Les valeurs de ces paramètres présentées dans la DAC concourent à minimiser l'impact de Cigéo. En effet, les porosités cinématiques utilisées pour calculer les vitesses d'écoulement dans les pores de la roche sont trop élevées d'au moins un ordre de grandeur pour des roches carbonatées fissurées. Il en résulte que les vitesses de pores calculées sont d'un ordre de grandeur trop lente. Ainsi l'Andra prévoit une arrivée des radionucléides aux exutoires naturels à l'échéance d'un million d'années, alors qu'une prise en compte de porosités cinématiques plus faibles (d'un ordre de grandeur inférieur, valeur couramment admise dans la littérature pour ces formations carbonatées) permet d'envisager une arrivée des radionucléides aux exutoires naturels à l'échéance de 100 000 ans.

Le modèle d'évolution hydrogéologique sur le prochain million d'années vise à intégrer les facteurs de contrôle des écoulements sur le très long terme. Il s'agit des contraintes tectoniques, climatiques et géomorphologiques. Les deux scénarii climatiques et les taux de surrection « *maximaliste* » et « *phénoménologique* » ont permis de définir quatre schémas d'évolution géomorphologique. Le modèle numérique géodynamique mis en œuvre pour calculer les évolutions géodynamiques sur l'emprise du secteur n'est pas décrit dans les documents de la DAC. Les résultats de ce modèle géodynamique qui concernent les évolutions de la morphologie de la surface et du bâti structural du domaine servent ensuite à prescrire les conditions aux limites du modèle hydrogéologique, contraint par les évolutions géodynamiques et climatiques, GEOAN développé par la Société Golder Associates.

Les résultats portent, tout d'abord, sur les évolutions géodynamiques, puis sur l'impact de ces évolutions sur les écoulements souterrains et sur le transport advectif d'éléments en solution.

Lors de la mise en œuvre des modèles, l'Andra est encouragée à mener une étude de sensibilité de ces modèles aux paramètres de la conductivité hydraulique, de l'emménagement et de la porosité cinématique en milieu fracturé.

Sommaire

1. Modèle régional hydrogéologique
 - 1.1 Description du modèle régional hydrogéologique
 - 1.2 Principaux résultats
 - 1.3 Atouts / points faibles / questionnements
 - 1.3.1 Atouts

- 1.3.2 Points faibles
- 1.3.3 Questionnements
- 1.3.4 Synthèse
- 2. Modèle de secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois
 - 2.1 Description du modèle de secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois
 - 2.2 Principaux résultats
 - 2.3 Atouts / points faibles / questionnements
 - 2.3.1 Atouts
 - 2.3.2 Points faibles & Questionnements
 - 2.3.3 Synthèse
- 3. Modèles d'écoulement région-secteur Meuse Haute-Marne, dits « de référence » & « de prédiction »
 - 3.1 Description des modèles d'écoulement région-secteur écoulement, dits « de référence » & « de prédiction »
 - 3.2 Principaux résultats
 - 3.3 Atouts / points faibles / questionnements
 - 3.3.1 Points faibles & Questionnements
 - 3.3.2 Synthèse
- 4. Modèle d'évolution hydrogéologique sur le prochain million d'années
 - 4.1 Description du modèle d'évolution hydrogéologique sur le prochain million d'années
 - 4.2 Principaux résultats
 - 4.3 Atouts / points faibles / questionnements
- 5. Modalités de transfert des radionucléides
 - 5.1 Description des modalités de transfert des radionucléides
 - 5.2 Principaux résultats
 - 5.3 Atouts / points faibles / questionnements
 - 5.3.1 Atouts
 - 5.3.2 Points faibles
 - 5.3.3 Questionnements
- 6. Recommandations
- 7. Références

1. Modèle régional hydrogéologique

1.1 Description du modèle régional hydrogéologique

Le modèle régional hydrogéologique du bassin de Paris a pour objectif de fournir les conditions aux limites hydrodynamiques à l'actuel (état hydrodynamique correspondant aux années 2000, date du début des travaux de modélisation hydrogéologique engagés par l'ANDRA) aux modèles de secteur hydrogéologique et géodynamique. L'intérêt a plus particulièrement porté sur les formations du Barrois, du Kimméridgien, de l'Oxfordien, du Callovo-Oxfordien et du Dogger. Il a été conçu avec l'outil numérique à base physique Ground Water. Ce dernier simule l'écoulement en milieu saturé en résolvant l'équation de la diffusivité par la méthode des éléments finis. L'emprise géométrique du modèle (250 000 km²) correspond à celle *sensu stricto* du bassin de Paris émergé. Le modèle est discrétisé verticalement en 27 couches litho-stratigraphiques du Trias au Tertiaire. Le maillage non-structuré de ce modèle assemblant des éléments

finis 3D, 2D et 1D permet de représenter les principales failles du bassin de Paris, le réseau hydrographique principal sur l'emprise régionale, le réseau hydrographique secondaire pour le secteur Est, et les conduits karstiques pour le secteur Est. Ce modèle intègre le modèle de secteur où le maillage est plus raffiné (dimension moyenne des arêtes des éléments : 250 m pour le modèle de secteur Est, contre 1650 m pour le modèle régional). Les paramètres hydrodynamiques du modèle sont spatialisés. Ils sont issus des paramètres obtenus par un précédent modèle développé par l'Institut Français du Pétrole (IFP) sur un secteur géographique moins étendu, notamment vers l'Ouest, et décrit dans le Dossier Argiles 2005. L'extrapolation des paramètres hydrodynamiques du modèle (conductivité hydraulique et porosité) vers l'Ouest a été obtenue par méthode géostatistique pour chacune des couches du modèle. De plus, afin d'assurer une transition des paramètres hydrodynamiques plus cohérente entre l'emprise régionale et celle du secteur local situé à l'Est, une interpolation géostatistique a été appliquée pour chaque couche. Le rôle hydrodynamique de drain ou de barrière à l'écoulement des failles régionales a été évalué grâce à une analyse de sensibilité du modèle d'écoulement. De plus, il est mentionné que ce rôle a été évalué à l'aide d'un modèle de transport de sel de façon indépendante. Les résultats de ce dernier ne sont pas présentés dans la DAC. Des outils d'aide au calage des paramètres du modèle par modélisation inverse ont pu être mis en œuvre.

Les conditions aux limites hydrodynamiques du modèle régional multicouche sont établies à l'actuel (années 2000).

1. A la surface du modèle, une condition de flux imposé spatialisé est prescrite correspondant à la part des précipitations qui est supposée recharger les aquifères.
2. Au niveau du réseau hydrographique, une condition de potentiel imposé est prescrite et correspond à l'altitude de la maille en m NGF. Cette condition contraignante nécessite lors de la calibration du modèle de s'assurer que les débits sortants sur ces mailles rivières sont comparables aux débits de base (débit issu du milieu souterrain restitué en rivière) observés aux stations hydrométriques.
3. A la limite avec la mer de Manche, une condition de charge imposée à 0 m NGF est appliquée.
4. En région parisienne et sur l'aquifère de l'Albien, un débit de pompage de 50 000 m³/J (18,25 Mm³/an) est prescrit.
5. Aux limites extérieures du modèle, une condition de flux nul est prescrite.

L'estimation du flux d'eau imposé à la surface du modèle résulte d'un calcul de bilan hydrologique permettant l'estimation de l'infiltration efficace. La mise en œuvre de ce calcul a nécessité :

1. La compilation des chroniques des précipitations moyennes annuelles 1971-2000 issues de 83 stations météorologiques (Météo France) et les précipitations annuelles moyennes 1973-2004 de 4 stations météorologiques du secteur Est. Les précipitations moyennes interannuelles pour l'ensemble du bassin de Paris sont de 792 mm/an. Pour le secteur Est, les précipitations moyennes interannuelles sont de 918 mm/an.
2. La compilation des chroniques d'ETP issues des données régionalisées par Météo France sur la période 1971-2000 (interpolation des données des stations sur une grille de mailles de 12 km). Les valeurs d'ETP aux stations sont calculées par la formule de Penman à pas de temps décadaire pour un couvert végétal de type prairie.
3. La compilation des chroniques de débits bancarisées par EauFrance. Cela représente trois stations par département pour l'échelle régionale, une dizaine de stations par département du secteur étendu et toutes les stations disponibles sur les départements de Meuse et Haute-Marne. Ainsi

les surfaces des bassins versants hydrologiques jaugés sont extrêmement variables de 9 à 110 000 km².

4. Les conductivités hydrauliques des formations présentes à l’affleurement.
5. Les mesures des charges hydrauliques des aquifères qui composent le bassin de Paris issues de la base de données InfoTerre gérée par le BRGM représentant 1255 valeurs diachrones.

Dans un premier temps, le bilan hydrologique de chaque bassin versant est réalisé afin d’estimer l’infiltration efficace en utilisant l’équation :

$$P = ETR + LR + I \quad \text{avec } P \text{ précipitations, } ETR \text{ évapotranspiration réelle, } LR \text{ lame d'eau ruisselée, } I \text{ infiltration efficace ou recharge}$$

Ces valeurs d’infiltration efficace ont ensuite été régionalisées et interpolées par krigeage.

Dans un second temps, le modèle hydrogéologique régional a été simplifié. Il est composé de deux couches : une couche de surface d’une épaisseur de 100 m (couche dite « *superficielle* ») et une couche profonde (couche dite « *inférieure* ») dont l’épaisseur est comprise entre la surface servant de mur à la couche superficielle et la surface inférieure du modèle. Les propriétés hydrodynamiques de la couche sont spatialement distribuées par zones représentatives des couches géologiques initialement à l’affleurement, seul leur nombre a été réduit de 27 à 18 unités. Les propriétés hydrodynamiques de la couche inférieure correspondent à la moyenne géométrique de l’empilement des propriétés des couches sur la verticale et sont spatialement distribuées. Les conditions aux limites du modèle bicouche sont identiques à celles du modèle régional multicouche, excepté la condition de pompage à l’Albien (condition n°4 décrite dans le paragraphe des conditions aux limites ci-dessus) qui n’est pas appliquée.

Les simulations ont été conduites en régime permanent. Le calage des paramètres du modèle a été réalisé à l’aide d’une méthode automatique et itérative d’optimisation utilisant l’algorithme PEST couplé au simulateur de l’écoulement Ground Water. Il s’agit d’optimiser la recharge et les valeurs de la conductivité hydraulique de la couche superficielle de façon à reproduire au mieux les 1255 points de charges hydrauliques observées. À noter que ces données sont diachrones (données instantanées ou chroniques compilées sur plusieurs décennies) et que certains aquifères, comme la Craie, peuvent enregistrer des amplitudes saisonnières de leur niveau piézométrique de plus de 10 mètres.

La stratégie de simulation du modèle hydrogéologique régional multicouche consiste à :

- s’assurer de la qualité des résultats obtenus
- permettre la cohérence entre les conductivités hydrauliques de la couche superficielle du modèle bicouche et celles du modèle multicouche par optimisation
- calibrer les conductivités hydrauliques des couches profondes du modèle multicouche
- activer le rôle hydraulique de drain ou de barrière des 19 failles régionales majeures représentées dans le modèle. Les failles de direction parallèle à la contrainte compressive majeure NO-SE sont considérées comme transmissives (rôle de drain), les failles de direction (NE-SO) perpendiculaires à cette contrainte sont considérées comme peu perméables (rôle de barrière). Pour ce faire, la valeur de la conductivité hydraulique de l’élément intercepté par la faille est multipliée par un facteur dépendant de l’angle formé entre le plan de la faille et la direction de la contrainte régionale. 3 scénarii ont été envisagés.

1.2 Principaux résultats

Le calage est considéré satisfaisant par les auteur.e.s, l'écart entre les charges hydrauliques calculées et observées est au maximum de 25 m et en moyenne de 8 m (CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, p.50). De même, les auteur.e.s sont satisfait.e.s de la carte piézométrique calculée à l'Albien, ainsi que de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique pour cet aquifère.

Une analyse de sensibilité des paramètres liés à l'activation ou non des failles sur les charges hydrauliques calculées par le modèle a été conduite. Cette analyse montre que cet impact est limité autour des structures de failles.

Une analyse de sensibilité des paramètres liés au rôle de drain ou de barrière des failles sur les charges hydrauliques et la distribution des teneurs en sel calculées par un modèle régional simplifié simulant de façon couplée l'écoulement et le transport densitaire ou non du sel a également été conduite. Ces travaux de modélisation du transport de sel ne sont pas présentés dans la DAC.

Ces deux analyses aboutissent à des scénarii optimaux différents, la première analyse favorise le scénario 3, alors que la seconde le scénario 2. In fine, les auteur.e.s privilégient le scénario 3 correspondant à un contraste de conductivité hydraulique entre la formation encaissante et la faille de 10^{-3} pour les failles les moins transmissives et 10^3 pour les failles les plus transmissives.

1.3 Atouts / Points faibles / Questionnements

1.3.1 Atouts

L'ANDRA propose un modèle hydrogéologique régional du bassin de Paris qui s'appuie sur une description de la géologie très détaillée qui représente une amélioration significative par rapport au modèle hydrogéologique présenté antérieurement par l'ANDRA (Dossier Argiles 2005). Ce nouveau modèle intègre une quantité importante de données et a nécessité un travail important pour permettre le bon déroulement des simulations numériques en régime permanent et s'assurer de la qualité des résultats. Les résultats issus d'un modèle en 3 dimensions ne sont pas toujours aisés à représenter compte tenu des dimensions relatives et très disproportionnées entre les axes (x, y) d'une part et (z) d'autre part. De plus, le nombre de points d'observation des niveaux d'eau permettant le calage du modèle reste modeste au regard de la complexité du système étudié. Pour y remédier, il est souhaitable d'ajouter d'autres données comme les débits de base à comparer aux débits (sommés) sortants du modèle aux rivières.

1.3.2 Points faibles

La qualité des résultats d'un modèle numérique peut être appréciée à chacune des étapes de sa construction : la qualité des données ayant permis sa construction, la qualité du modèle conceptuel hydrogéologique qui résulte de l'analyse des données, les simplifications nécessaires pour la compatibilité avec le modèle numérique et les objectifs visés, la méthode de calage des inconnues du modèle, l'évaluation du bilan en eau, la qualité des résultats obtenus et leurs confrontations avec les données observées ou avec d'autres résultats de modèles équivalents, l'incertitude sur les résultats ou sur les scénarii testés.

Les documents consultés présentent de façon succincte les données ayant permis la construction du modèle (géométrie, surface, lithologie, propriétés hydrodynamiques...) et indiquent seulement les méthodes retenues pour l'interpolation des données issues de forages ou de prospections géophysiques.

Les principales inconnues du modèle d'écoulement lors de sa construction sont les valeurs du flux de recharge et celles de la distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques (conductivités hydrauliques) connues de façon ponctuelle sur quelques formations seulement. Les résultats des simulations en régime permanent du modèle hydrogéologique régional sont comparés aux valeurs de charges hydrauliques observées. Le bilan en eau pour chaque formation et à l'échelle globale du domaine modélisé n'est pas mentionné.

Les valeurs du flux de recharge sont obtenues dans un premier temps par une approche classique de bilan hydrologique à l'échelle des bassins versants. Il s'agit de comparer les flux d'eau de recharge des systèmes aquifères (Pluie – ETR – Ruissellement) avec les débits de base observés aux stations hydrométriques (part de l'écoulement souterrain qui alimente les rivières) et de s'assurer que les flux de sortie du modèle sur ces mailles rivières sont du même ordre de grandeur. Le bilan hydrologique obtenu à l'échelle global aurait pu être mentionné et comparé aux études publiées dans la littérature (Wei et al., 1990 ; Raoult, 1999 ; Contoux et al., 2013). L'effet du changement climatique observé depuis les années 1990 sur l'évolution du bilan hydrologique du bassin de Paris n'est pas discuté. En effet, si les chroniques pluviométriques ne montrent pas une tendance bien marquée dans les cumuls annuels, l'augmentation de la température de +1,5°C depuis les années 1990, conduit à une augmentation de l'ETP et une diminution de la pluie efficace, donc à une modification de la répartition de celle-ci entre le flux de ruissellement et celui de la recharge des aquifères. Puis, dans un second temps, le modèle hydrogéologique régional est simplifié en modèle bicouche pour obtenir le bilan hydrologique spatialisé. Les valeurs de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique de la couche superficielle sont calibrées de façon à être compatibles avec la lame d'eau infiltrée. Ainsi, les conductivités hydrauliques de la couche superficielle représentant les formations peu perméables sont surestimées (Figure 2-25, CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, p.47). Là encore le bilan hydrologique global aurait pu être présenté, comparé avec le bilan initial et discuté par rapport aux études publiées dans la littérature (Wei et al., 1990 ; Raoult, 1999 ; Contoux et al., 2013).

Le modèle hydrogéologique régional multicouche simule en régime permanent les écoulements sous conditions environnementales à l'actuel (années 2000) et compare les charges hydrauliques calculées aux charges hydrauliques observées, notamment en 1995 pour l'aquifère de l'Albien. Tout d'abord, la condition à la limite des pompages à l'Albien n'apparaît pas comme judicieuse étant donné que la surface piézométrique observée à l'Albien a évolué significativement en ampleur (extension et rabattement) depuis la mise en exploitation de cet aquifère en 1841, notamment en raison d'un taux de prélèvement excessif par rapport à sa recharge naturelle et variable au cours du temps. Le cône de dépression piézométrique à l'Albien résulte de l'effet cumulé des pompages depuis cette date. Il ne peut être reproduit à l'aide d'une simulation en régime permanent sans entraîner une distorsion dans les valeurs de conductivités hydrauliques calibrées (Raoult, 1999 ; Contoux et al., 2013). Par ailleurs, l'aquifère de l'Albien est un aquifère profond qui dispose de 70 valeurs de transmissivités (la transmissivité est le produit de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur saturée de l'aquifère testé lors de l'essai de pompage, i.e. épaisseur des niveaux de sables) obtenues par essais de débits de longues durées (Lauverjat, 1967). À plusieurs reprises dans la littérature scientifique, il a été montré que l'utilisation des valeurs de conductivités hydrauliques obtenues par tests de pompage longue durée était préférable à celles obtenues par calage (Raoult, 1999 ; Contoux et al., 2013). À cet égard, la comparaison entre la distribution spatiale des transmissivités issues des essais de pompage et spatialisées par krigeage et la distribution des

conductivités hydrauliques obtenues à l'issue du calage du modèle régional multicouche montre le biais inerrant à une mauvaise conceptualisation du modèle numérique hydrogéologique (Figure 1). Un graphique permettant la comparaison entre les transmissivités mesurées et les transmissivités calculées aurait été plus pertinent.

Dans le document (CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, p. 49), il est mentionné que « *le modèle a été calibré sur 1255 points de mesure du système aquifère ainsi que par les cartes piézométriques de l'Albien et du Néocomien.* » Sur quelle période de temps ces données ont-elles été compilées ? Depuis 1990, la piézométrie de l'aquifère de l'Albien remonte ; le minimum piézométrique au droit de Paris a gagné 20 mètres entre 1995 et 2018 (Dupaigne et Violette, 2020). Là encore, la comparaison entre un système transitoire et une simulation en régime permanent a peu de signification.

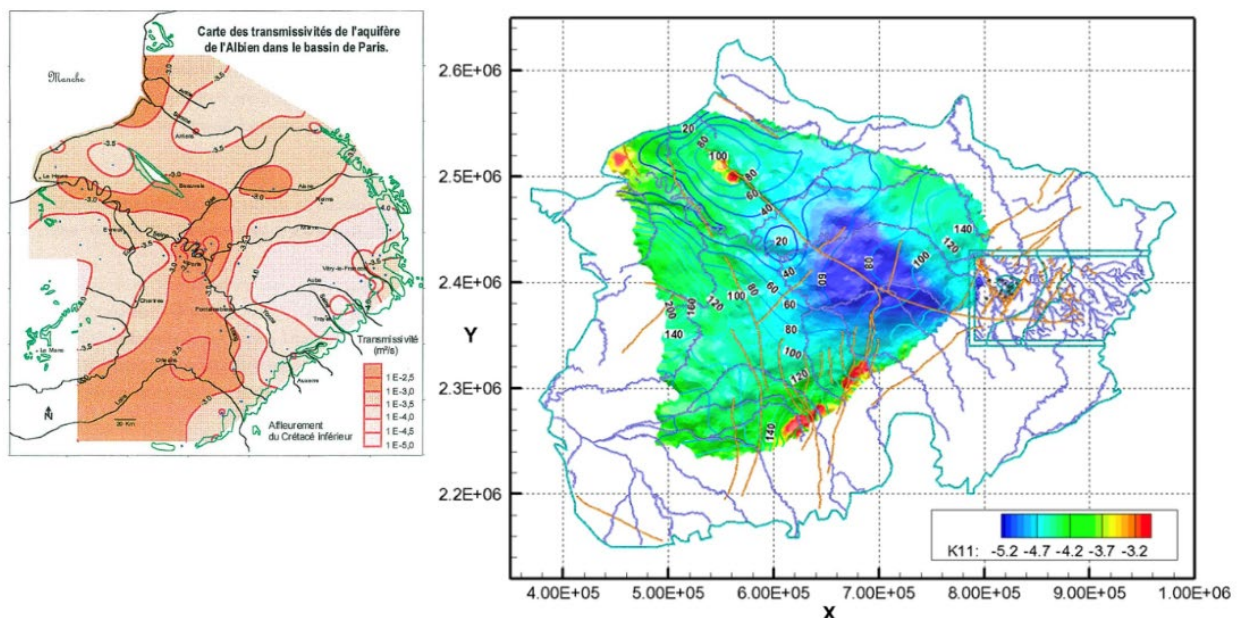


Figure 1 – A gauche, distribution spatiale des transmissivités ($T = K \times \text{épaisseur saturée}$, en log de T) à l'Albien obtenue par krigeage à partir de 70 valeurs déduites d'essais de pompage de longue durée (Raoult, 1999). A droite, carte piézométrique de l'Albien calculée (lignes bleues) et distribution spatiale de la conductivité hydraulique (K , en log, variation de couleur) obtenue après calage du modèle hydrogéologique multicouche (Figure 2-27, CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A)

A la lumière de ces remarques l'affirmation « *La calibration ainsi obtenue est en concordance avec toutes les études antérieures menées sur le Bassin parisien* » nécessiterait d'être modulée et aussi de mentionner la source des études antérieures auxquelles il est fait référence.

Une simulation de référence sans pompage à l'Albien et conditions aux limites moyennes du climat XX^{ème} siècle aurait pu être comparée à la carte de l'Albien anté-exploitation (Raoult, 1999). Cette simulation aurait permis une meilleure calibration des conductivités hydrauliques du modèle régional.

La comparaison de la carte piézométrique simulée au Dogger par le modèle régional avec celle observée dans les années 1980 (Rojas, 1989) serait intéressante.

Le fait de ne pas être en mesure d'utiliser les données disponibles par différents traceurs (sel, isotopes...) pourrait être mieux justifié, d'autant que le modèle mis en œuvre n'est pas décrit. Là encore, le rôle de l'histoire géologique du bassin depuis sa genèse sur le transport du sel (Gonçalvès et al., 2003 ; Gonçalvès et al., 2004) et l'impact des paléoclimats sur l'inversion des drainances (Jost, 2005) rend peu crédible une approche en régime permanent.

1.3.3 Synthèse

Le nouveau modèle hydrogéologique construit à l'aide de l'outil Ground Water présente une amélioration significative par rapport au modèle précédemment développé par l'IFP (Dossier Argiles 2005). En effet, l'accent a été porté sur une représentation rigoureuse de sa géométrie, de ses formations géologiques et des structures tectoniques pouvant jouer un rôle de barrière ou de drain vis-à-vis des écoulements souterrains. Cependant, le modèle conceptuel hydrogéologique présente plusieurs défauts : i) la stratégie de modélisation qui a consisté à considérer un régime permanent à l'équilibre avec les conditions environnementales à l'actuel, n'est pas fondée compte tenu des connaissances acquises sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin de Paris. Il en résulte que la distribution spatiale des conductivités hydrauliques de la formation Albien représentée dans le modèle n'est pas correcte ; ii) l'absence de comparaison du bilan hydrologique calculé avec les études antérieures, et l'absence de comparaison entre les paramètres hydrodynamiques optimisés par le modèle avec ceux observés dans certaines formations rendent peu crédible les résultats obtenus par le modèle hydrogéologique régional. **Les conductivités hydrauliques obtenues par calage pourraient être d'un à deux ordres de grandeur supérieures à celles qui sont observées tant pour les aquifères que pour les aquitards (Contoux et al., 2013). Ainsi, l'amplitude des perturbations hydrauliques qui seront calculées ultérieurement à l'échelle du secteur en prescrivant des conditions aux limites hydrodynamiques issues du modèle régional pourrait être minimisée.**

2. Modèle de secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois

2.1 Description du modèle de secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois

Le modèle de secteur hydrogéologique des calcaires du Barrois a pour objectif d'étudier les interactions entre les écoulements de surface et souterrains à l'actuel et au cours de la période d'exploitation du site (150 ans) en fonction de différents scénarii climatiques ou d'aménagements du site et de le comparer aux simulations dites « *de référence* ». Il a été conçu avec l'outil numérique à base physique Feflow. L'ANDRA nous a précisé (documents transmis en date du 10 juin 2025) : « *ce code de calcul couple l'équation de l'onde diffusante pour la simulation de l'écoulement de surface avec les équations de Darcy et Richards pour la simulation des écoulements souterrains saturés et variablement saturés.* » En ne représentant que les calcaires du Barrois, une hypothèse forte a été prescrite par les auteur.e.s à savoir « *un découplage hydraulique entre un système aquifère superficiel (les Calcaires du Barrois) et un système aquifère plus profond (les calcaires de l'Oxfordien) permis par la présence de la série intercalaire très peu perméable des marnes du Kimméridgien.* » (Pièce 6, Volume 7, p.82). Le modèle intègre les Calcaires du Barrois, depuis les Calcaires Cariés et Tachetés jusqu'aux Calcaires sub-lithographiques sur une emprise de 290 km², qui inclut les limites de l'aquifère des Calcaires du Barrois et les bassins versants de la Saulx, de l'Orge, de l'Ormançon et de la rive gauche de l'Ornain.

Les conditions aux limites hydrodynamiques appliquées au modèle sont les suivantes :

1. Aux affleurements : une condition de recharge spatialisée. La valeur appliquée correspond à la pluie nette (lame d'eau disponible à l'écoulement P-ETR) obtenue grâce aux données de la station météorologique d'Houdelaincourt, soit 270 mm/an en moyenne interannuelle. Cette recharge se produit pendant les mois d'automne-hiver.
2. Anciens réseaux hydrographiques très fracturés : une condition d'apport de flux d'eau à l'aquifère différé dans le temps. Cette hypothèse a été formulée par les auteur.e.s à la suite d'observations montrant que les niveaux piézométriques sont stabilisés en période d'étiage alors que la recharge par les précipitations est inopérante.
3. Le long de certains tronçons des cours d'eau : une condition variable dans le temps de flux d'eau entrants ou sortants pour représenter les pertes ou résurgences en rivières selon l'état hydrodynamique de l'aquifère.
4. À la limite nord du modèle, une condition de potentiel imposé variable dans le temps est prescrite.
5. Aux limites sud et ouest, une condition de flux nul est prescrite.

Afin de rendre compte des fortes hétérogénéités de ces formations calcaires fissurées dans ce modèle numérique, le choix a été fait par les auteur.e.s d' « assimiler l'aquifère à un milieu continu de porosité matricielle (défini par un maillage 3D décrivant cette structure poreuse) ; d'ajouter localement à l'ensemble, des éléments discrets permettant de représenter des écoulements en conduits (1D : rivières, tunnels, puits et réseau karstiques) ou en fracture plane (2D : surfaces de ruissellement, plans de failles ou de fractures). L'interaction entre les deux milieux s'opère par l'échange d'un débit entre le milieu matriciel et les fractures du domaine. C'est une approche mixte dite « double porosité/double perméabilité » mêlant circulations en milieu poreux et écoulements en fractures » (Pièce 6, Volume 7, p.83).

Les onze niveaux litho-stratigraphiques possèdent des conductivités hydrauliques homogènes sur chaque niveau et possèdent un rapport 10 entre K_h/K_v , excepté pour le Kimméridgien inférieur et moyen (Tableau 5-13, Pièce 6, Volume 7, p.84). La zone fracturée possède des conductivités hydrauliques hétérogènes et isotropes ($3.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ à $3.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$). La distribution des conductivités hydrauliques de la zone fracturée a fait l'objet d'un calage.

Les faibles valeurs d'emménagement spécifique (S_s) estimées lors des tests de pompage (entre 1.10^{-5} et 5.10^{-4}) traduisent un comportement en charge du réseau de fracture, assimilable au comportement d'un aquifère captif.

Dans un premier temps, le calage des paramètres du modèles (K et S_s) du modèle en régime transitoire est contraint par les données journalières disponibles sur une sélection de 30 piézomètres de novembre 2011 à octobre 2018 (sept cycles hydrologiques), les jaugeages en rivières et les débits des sources. Ainsi, la cohérence des transferts entre eaux de surface et eaux souterraines, le bilan global du modèle et le respect des assecs en période d'étiage le long des cours d'eau sont évalués.

Dans un second temps, plusieurs processus d'optimisation sont lancés successivement pour affiner le calage et/ou tester différentes hypothèses concernant : la géométrie des fractures, la position des drains, la géométrie des vallons secs (position et cote), et la recharge météorique.

2.2 Principaux résultats

Calcaires sub-lithographiques

Selon les auteur.e.s, « le modèle hydrogéologique calé reproduit de manière satisfaisante le comportement hydrodynamique des calcaires sub-lithographiques. (...) Le bilan de masse final (bilan des flux entrants et sortants du modèle) montre que les entrées d'eau du modèle sont assurées, approximativement, pour moitié par la recharge pluviométrique et, pour le reste, par l'injection d'eau au droit des vallons secs. Les sorties d'eau ont lieu principalement au droit des cours d'eau drainants et, en quantité moindre, à travers la limite nord de l'aquifère représentée par un potentiel imposé (10 % du flux total). » (Pièce 6, Volume 7, p.85).

Calcaires de Dommartin

Le comportement hydrodynamique des calcaires de Dommartin montre un comportement contrasté entre les périodes d'étiage et les périodes de hautes eaux. Les auteur.e.s soulignent que « le nombre de piézomètres avec des chroniques piézométriques exploitables pour le calage est relativement faible. Pour certains de ces piézomètres, le calage montre une certaine adéquation entre les niveaux mesurés et simulés, notamment en matière de dynamique de crue/décru, bien que les pics soient surestimés ou sous-estimés (cf. Figure 5-14). Pour d'autres, le calage est moins bon. » (Pièce 6, Volume 7, p.85). La confrontation avec les chroniques de débit n'est pas présentée.

Évaluation de l'impact des installations de surface de Cigéo

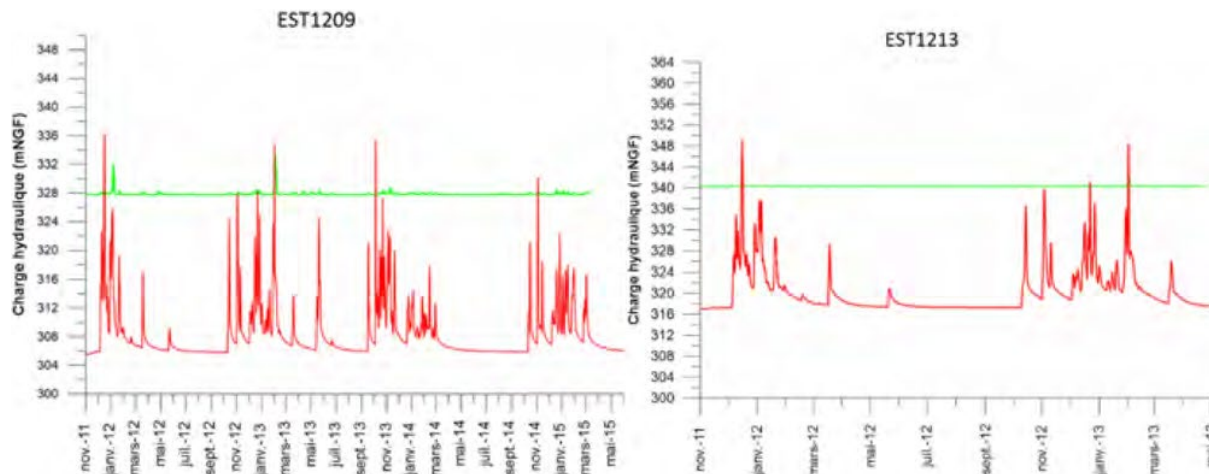
Afin d'évaluer l'impact des installations Cigéo et du changement climatique sur le comportement hydrodynamique des aquifères trois types de simulations ont été conduites :

1. Une année humide représentative, 2013 avec un total de 1000 mm/an de précipitations
2. Une année sèche représentative, 2015 avec un total de 700 mm/an de précipitations.
3. Un évènement ponctuel caractéristique de haute eaux (HE) et sa décrue complète.

L'ensemble des installations a été intégré au modèle.

Les zones imperméabilisées par les voiries ou bâtiments possèdent une recharge nulle et les zones terrassées voient leur recharge réduite de 5% par rapport à la valeur initiale. Le choix de cette valeur de réduction de la recharge pourrait être discuté ou étayé par des données issues de tests d'infiltration.

Les résultats du modèle sont peu satisfaisants, comme le souligne les auteur.e.s (Pièce 6, Volume 7, p.86) : « Comme le montre l'exemple de la figure 5-15, les charges calculées au niveau de certains piézomètres de la zone puits ne reproduisent pas correctement les variations mesurées. Ce manque de représentativité du modèle est possiblement lié à l'approximation faite quant à la représentation du fonctionnement karstique des calcaires sublithographiques et de Dommartin, représentation qui ne correspond plus à la conceptualisation actuelle développée postérieurement à la construction du modèle. »



CG-TE-D-MGE-CEGI-ESE-0000-22-0012-A

Figure 5-15 Comparaison des cotes piézométriques observées (rouge) et simulées (vert) aux piézomètres EST1209 et EST1213.

Le développement d'un nouveau modèle capable de reproduire le comportement hydrodynamique karstique des calcaires du Barrois a été confié au CHYN (Centre hydrogéologique et de géothermie de Neuchâtel). Ce nouveau modèle s'appuiera sur de nouvelles campagnes de caractérisation du système réalisées par l'ANDRA en collaboration avec le BRGM. Aucune échéance des livrables n'est mentionnée dans le rapport (Pièce 6, Volume 7). L'ANDRA nous a indiqué (documents transmis en date du 10 juin 2025) : « Ces travaux de modélisation seront intégrés dans l'étude d'impact à des échéances post-DAC. L'Andra renvoie également vers l'engagement pris auprès de l'ASNR dans le cadre de l'instruction de la DAC (engagement 2024-E4 : "L'Andra transmettra, au plus tard au début des terrassements des plateformes en zone descendrière et en zone puits lors de la construction initiale, 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 travaux visera notamment à distinguer les différentes nappes présentes en zone puits et en zone descendrière. Sur la base de l'analyse des résultats des travaux précédents et des expérimentations prévues sur les verses, l'Andra proposera un programme de surveillance des nappes du Barrois actualisé au plus tard lors de la mise en service" ».

2.3 Atouts / points faibles / questionnements

2.3.1 Atouts

Le système karstique de l'aquifère des calcaires du Barrois est un système complexe qu'il n'est pas aisé de reproduire à l'aide d'un outil de simulation numérique. Les auteurs en sont conscient.e.s et envisagent d'approfondir le sujet à l'aide d'études ultérieures.

2.3.2 Points faibles & Questionnements

L'hypothèse qui consiste à isoler le système des calcaires du Barrois des systèmes inférieurs ne peut se justifier si les simulations sont conduites sur la période d'exploitation du site de l'ordre d'une centaine d'années. En effet, sur une période séculaire, les phénomènes de drainance (échanges de flux d'eau entre aquifères au travers d'une formation très peu perméable) peuvent devenir significatifs (Contoux et al., 2013).

Le bilan d'eau montre que l'apport en eau au système provient pour moitié de la recharge par la pluie nette et pour l'autre moitié par l'injection d'eau au droit des vallons secs. Dans ce cas, quelle est l'origine de l'eau injectée au niveau des vallons secs ? Il est important de s'assurer que la somme de ces apports au système est compatible avec la pluie nette tombée sur les bassins versants hydrogéologiques.

Les paramètres du modèle présentés au tableau 5-13 (Pièce 6, Volume 7, p.84) pourraient être confrontés aux valeurs de conductivités hydrauliques obtenues in situ (valeurs minimales, maximales et moyennes) sur les formations testées. De même, les valeurs de coefficient d'emmagasinements spécifiques retenues dans le modèle et celles acquises sur le terrain doivent figurer dans le rapport.

Le calage des paramètres du modèle à l'aide des chroniques piézométriques est peu convainquant soit par l'absence de figures/graphiques permettant la confrontation des données observées aux données simulées (cas du calcaire sub-lithographique) ou par une seule figure (Figure 5-14, Pièce 6, Volume 7, p.86) relative aux calcaires de Dommartin qui ne permet pas de valider le calage étant donné le comportement hydrodynamique différent entre les piézométries observées au forage EST5078 et celles simulées par le modèle.

Il serait utile de disposer des données piézométriques acquises sur le secteur afin de comprendre le comportement hydrodynamique de chaque aquifère. En effet, les informations temporelles, chroniques piézométriques et débits des rivières confrontées aux données climatologiques sur la période passée pluri-décennale font défaut dans le rapport pour apprécier l'évolution des niveaux et des débits en fonction des conditions climatiques, mais également pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des aquifères et l'impact de la construction du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne sur la dynamique des aquifères lors des deux dernières décennies. De plus, la simulation de l'impact de la construction du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne permettrait de valider les simulations numériques de façon plus rigoureuse.

La réduction de 5% de la recharge des zones terrassées apparaît peu crédible et cette valeur pourrait être discutée ou étayée par des données issues de tests d'infiltration.

L'une des attentes du modèle est d'évaluer l'impact du changement climatique. Cependant, l'analyse des données climatologiques est très parcellaire et disparate (Pièce 6, Volume 3, Chapitre 2). Les chroniques analysées sont courtes (7 ans), et les périodes retenues pour l'analyse sont différentes d'une station à l'autre ou d'une variable à l'autre (Précipitations 2012 à 2019 ; Température 1980 à 2020 ; Chute de neige 2007 à 2016). Une analyse détaillée de la chronique la plus longue de la station locale de Saint-Dizier qui enregistre les variables climatiques depuis janvier 1859 jusqu'à nos jours aurait permis de caractériser le climat local, d'identifier les extrêmes climatiques (maximum et minimum des précipitations et de la pluie efficace) et d'évaluer l'impact du changement climatique à l'œuvre depuis une trentaine d'années (augmentation des températures, modification du bilan hydrologique, conséquence sur la dynamique des aquifères). Enfin, les auteur.e.s considèrent que dans le secteur d'étude, l'impact du changement climatique représente : « *un enjeu faible* » (Pièce 6, Volume 3, Chapitre 2, p.27). Il est permis d'en douter car les systèmes karstiques sont très sensibles au changement climatique. Une analyse rigoureuse des données climatologiques, hydrologiques et hydrodynamiques à l'échelle locale est vivement recommandée.

2.3.3 Synthèse

Le modèle hydrogéologique des calcaires du Barrois présenté dans la DAC ne permet pas de reproduire le fonctionnement hydrodynamique de cet aquifère complexe. Le modèle conceptuel hydrogéologique doit être repensé et doit pouvoir s'appuyer sur un jeu de données solide.

Le fonctionnement hydrodynamique des calcaires du Barrois nécessite une étude approfondie qui tienne compte de son évolution à l'état naturel et lors du creusement du laboratoire de recherche souterrain Meuse/Haute-Marne. De cette analyse pourra découler un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de ce système qui pourra ensuite être adapté à un outil de simulation numérique afin d'être en mesure d'évaluer l'impact du creusement des infrastructures du centre de stockage Cigéo sur le fonctionnement de ce système karstique.

3. Modèles d'écoulement région-secteur Meuse Haute-Marne, dits « de référence » & « de prédiction »

3.1 Description des modèles d'écoulement région-secteur Meuse Haute-Marne, dits « de référence » & « de prédiction »

Le modèle d'écoulement région-secteur Meuse Haute-Marne, dit « de référence », a pour objectif de fournir l'état hydrodynamique initial pour le modèle de l'évolution des écoulements sous conditions géodynamiques évolutives (prochain million d'années). Il a été conçu avec l'outil numérique à base physique Ground Water. Il a été calé en régime permanent d'écoulement, les failles et zones de fracturation diffuses ont fait l'objet de tests de sensibilité. Les trajectoires des éléments en solution ont été calculées à l'aide d'un module de type « *particle-tracking* » simulant un transport advectif. Ce modèle multicouche se focalise sur les formations du Dogger, des argilites du Callovo-Oxfordien et de l'Oxfordien calcaire. L'alternance entre les différents niveaux poreux aquifères et les niveaux peu perméables aquitards s'appuie sur les connaissances acquises lors des campagnes de reconnaissance de la zone de transposition (RZT). Dans la zone dite « de secteur », le maillage intègre alors localement 70 niveaux verticalement, son extension spatiale (290 km²) intègre le laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (LS), la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA), la zone de transposition (ZT) et la zone de fracturation diffuse (ZFD).

La stratégie de calage des formations carbonatées du Dogger et de l'Oxfordien, encaissant des argilites du Callovo-Oxfordien, s'est déroulée en deux étapes. La première a cherché par une approche probabiliste à identifier les zones à conductivité hydraulique élevée, principalement au niveau des affleurements du Dogger et de l'Oxfordien. La seconde a consisté à reproduire par essai-erreur les directions d'écoulement observées à l'actuel dans ces deux formations en considérant que les failles étaient transparentes à l'écoulement. La première étape fondée sur 1000 simulations équiprobables a permis d'identifier les zones affleurantes du Dogger calcaire comme possédant de fortes conductivités hydrauliques (10⁻⁶ m/s). La seconde étape a permis d'associer les conductivités hydrauliques élevées du Dogger au faciès des calcaires granulaires et les conductivités hydrauliques faibles du Dogger au faciès de la Dalle nacrée et des Marnes de Longwy. In fine, selon les auteurs la qualité du calage des écoulements est attestée par la comparaison entre les charges observées et calculées dans les deux aquifères.

Le modèle d'écoulement dit « *de référence* » résulte du calage des propriétés hydrodynamiques (conductivité hydraulique) en régime permanent contraint par les conditions environnementales à l'actuel

et la comparaison entre les données de charge hydrauliques observées à l'actuel et simulées. Cette simulation constitue l'état initial du système pour les modèles dits « de prédiction ». Ces modèles de prédiction sont établis en transitoire sur deux échelles de temps :

- Sur le prochain siècle (100 ans) en correspondance avec la période de fonctionnement du futur site de stockage. Les propriétés hydrodynamiques du modèle, conductivités hydrauliques et coefficients d'emmagasinement (capacité que possède le milieu poreux à stocker ou déstocker un volume d'eau sous l'effet d'une différence de charge unitaire) sont calées en régime d'écoulement transitoire de façon à reproduire l'évolution temporelle des charges hydrauliques observées au droit des forages et puits d'accès depuis leur creusement. Les perturbations hydrauliques, engendrées par le creusement des puits du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne au travers de la formation de l'Oxfordien, ont été observées. Chaque horizon poreux se voit attribué une valeur de conductivité hydraulique qui n'est pas discrétisée spatialement. Pour le transport des particules par advection, les valeurs de porosité cinématique sont égales à 40% de la porosité totale (dans le secteur Est, les porosités totales sont comprises entre 0,1 et 0,22 ; les porosités cinématiques sont alors comprises entre 0,04 et 0,088). Elles sont discrétisées spatialement.
- Sur le prochain million d'années correspondant à l'évolution du site après fermeture, le transport des éléments en solution par advection s'appuie sur une simulation de l'écoulement en régime permanent fondée sur les conditions aux limites à l'actuel et des évolutions géodynamiques (climat, surrection tectonique et érosion) qui reposent sur des données de terrain.

Une attention particulière a été portée sur le rôle hydrodynamique des failles présentes sur le secteur local, c.-à-d. : failles de la Marne, de Poissons et de Brouthières (orientation NO-SE), des failles de Joinville et de Gondrecourt (orientation NE-SO) et la faille de Vittel (orientation E-O), mais également sur la zone de fracturation diffuse présente au SO du site. Les failles dont l'orientation est subparallèle à l'orientation des principales contraintes à l'actuel sont considérées comme transmissives, alors que les autres failles à l'exception de la partie Sud du fossé de Gondrecourt sont considérées comme étanches. Cinq scénarii du facteur multiplicatif de la conductivité hydraulique affecté aux failles locales ont été testés afin d'évaluer la sensibilité du modèle. La fracturation diffuse a fait l'objet d'une analyse de sensibilité probabiliste fondée sur la mise en œuvre du code FRACA pour générer de façon stochastique un réseau de fractures diffuses compatible avec les observations de terrain (orientation, longueur et ouverture). Puis, ce réseau a permis de contraindre les 100 réalisations équiprobables de réseaux de fractures diffuses par le code FRACNET3D. Le réseau de fractures d'orientation NO-SE possède un rôle hydraulique notable, notamment à l'Ouest de la vallée de la Saulx.

3.2 Principaux résultats

L'analyse des données piézométriques collectées sur l'aquifère du Barrois a permis d'identifier les directions d'écoulement à l'actuel (Pièce 6, Volume 3, Figure 5-6, p.120). Cet aquifère est drainé à la fois par les vallées des cours d'eau (Saulx, Orge, Ormançon) qui l'incisent, et les sources de débordement ou des écoulements hypodermiques localisés dans la frange d'altération de la formation calcaire notamment à l'amont des versants des vallons incisés comme c'est le cas sur le pourtour situé à l'Est, au Sud et au Sud-Ouest des affleurements des calcaires du Barrois.

La carte piézométrique de l'aquifère des calcaires de l'Oxfordien à l'actuel (Pièce 6, Volume 3, Figure 5-7, p.121) indique que l'écoulement général dans la partie captive (sous recouvrement des formations des

marnes du Kimméridgien) est orienté vers le Nord-Ouest. Les auteur.e.s mentionnent : « *Au droit de la zone d'implantation du projet global Cigéo et sur la zone de transposition (ZT) de manière générale, l'Oxfordien calcaire n'est ni fracturé ni à l'affleurement : sa perméabilité y est faible, de 10^{-7} m.s⁻¹ à 10^{-9} m.s⁻¹. (...) Le gradient de charge hydraulique moyen (pente de la nappe) est inférieur au pourcent avec des vitesses moyennes d'écoulement de l'ordre d'un km par 100 000 ans* » (0,01 m/an). Les auteur.e.s font ici référence au flux de Darcy au travers d'une section de milieu poreux qui peut être déduite de l'analyse de la carte piézométrique qui fournit le gradient hydraulique (i) et des données de conductivité hydraulique (K). Ainsi, le flux de Darcy, $U = K \times i$. La recharge par les pluies en zone d'affleurement au Sud-Est, se fait au-delà du fossé de Gondrecourt-le-Château. Dans cette zone d'affleurement, l'écoulement suit l'orientation de la vallée de la Meuse du Sud-Ouest vers le Nord. Le long des affleurements (vallée de la Meuse) de nombreuses sources et la rivière de la Meuse drainent également l'aquifère.

Il est à noter que ces deux aquifères calcaires du Barrois et de l'Oxfordien calcaires seront rencontrés lors des opérations de création du centre de stockage Cigéo, i.e. : zone puits et zone descendrie.

L'aquifère du Dogger est composé des calcaires du Bajocien surmontés des marnes de Longwy et des calcaires du Bathonien. Ces formations affleurent dans la région de Chaumont à 30 km à l'Est de la zone d'implantation du site. Aux affleurements, ces aquifères libres sont fracturés et se rechargent par la part des précipitations qui échappe à la reprise évaporatoire et au ruissellement direct. Sous le site, les aquifères sont captifs, peu perméables (conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-8} m.s⁻¹ en valeur moyenne, variant de 10^{-7} m.s⁻¹ à 10^{-10} m.s⁻¹). La carte piézométrique au Dogger est présentée en figure 2-5 (Pièce 7, volume 4, p.68). Les auteur.e.s indiquent que « *Les écoulements de la nappe du Bathonien sont globalement orientés vers le Nord-Ouest, avec un gradient hydraulique moyen de 0,1 %, et une vitesse d'écoulement (au sens de Darcy) de l'ordre de 5 km en 100 000 ans.* ». Ce flux de Darcy est donc de l'ordre de 0,05 m/an, soit cinq fois plus rapide que celui déterminé pour les calcaires de l'Oxfordien. Les auteur.e.s mentionnent également (Pièce 7, volume 4, p.68) « *Au Sud-Ouest de la zone de transposition, dans la zone de fracturation diffuse (cf. Figure 2-5), les écoulements dans le Dogger sont globalement orientés vers le sud-ouest. Les écoulements y sont plus importants comme en témoigne la salinité des eaux localement dix fois plus faible que celle mesurée au droit de la zone de transposition. Cette déviation des écoulements dans le Dogger au niveau de la zone de fracturation diffuse conduit à l'apparition d'un exutoire naturel dans la vallée de la Marne à 30 km au Sud-Ouest de la zone de transposition (à proximité de la commune de Bologne).* » Deux piézomètres permettent de suivre leur évolution temporelle qui est peu marquée.

Les résultats de la simulation « *de référence* » du modèle d'écoulement en régime permanent et du transport advectif sont présentés pour l'aquifère de l'Oxfordien calcaire, puis de l'aquifère du Dogger calcaire (Pièce 6, Volume 7, Figure 5-35, 5-36 & Pièce 7, Volume 7, Figure 2-4, p.46). L'écart moyen entre les charges hydrauliques calculées et observées est inférieur à 5 m pour l'aquifère de l'Oxfordien et à 3 m pour l'aquifère du Dogger. Les trajectoires des particules (particle tracking) injectées dans la couche de l'Oxfordien calcaire au droit de la ZIOS se déplacent le long de la ligne d'écoulement en direction du NO.

Les simulations « *prédictives* » sur un million d'années en considérant que les conditions aux limites géodynamiques n'évoluent pas, montrent que leur exutoire reste régional. La vitesse moyenne calculée de l'eau dans les pores de la roche de l'Oxfordien calcaire ($u^* = U / \omega_c$) en considérant une porosité cinématique de l'ordre de 40% de la porosité totale est de 4 km/100 ka (0,04 m/an). Les trajectoires des particules (particle tracking) injectées dans la couche des calcaires du Dogger au droit de la ZIOS se déplacent en direction du NO sur l'emprise de la ZT, avant d'être déviées plus à l'Ouest par la faille de la

Marne vers un exutoire local situé à moins de 30 km de la ZIOS. La vitesse moyenne calculée de l'eau dans les pores de la roche du Dogger en considérant une porosité cinématique de l'ordre de 40% de la porosité totale est de la dizaine de km/100 ka (0,1 m/an).

Au travers des argilites du Callovo-Oxfordien, les gradients hydrauliques verticaux calculés sont orientés vers le bas au SE de la ZT (entre les failles de Gondrecourt et de la Marne). Ailleurs, les gradients hydrauliques verticaux calculés sont orientés vers le haut. L'impact de ces flux de drainance sur le transport d'éléments en solution associé n'est pas étudié avec ce modèle.

Des simulations « prédictives » en régime transitoire d'écoulement sur le prochain siècle ont été conduites pour évaluer l'impact hydraulique des travaux d'excavation des ouvrages souterrains pendant la période d'exploitation du site (100 ans). Les résultats sont présentés dans le document Pièce 6, Volume 4 (p.182). Le rabattement de l'aquifère de l'Oxfordien inférieur atteint -200 m au bout de 40 ans et est plus modeste pour l'aquifère de l'Oxfordien supérieur. Selon les auteur.e.s « *l'extension de ces zones d'impact reste limitée et n'affecte pas les points d'accès à l'eau potable* ». La comparaison des simulations transitoires avec les simulations conduites en régime permanent montre que le régime permanent est quasiment atteint au bout de 100 ans.

3.3 Atouts / points faibles / questionnements

3.3.1 Points faibles & Questionnements

La carte piézométrique observée des calcaires du Barrois présente l'état piézométrique en hautes eaux mais ne mentionne pas la date d'acquisition des données piézométriques ayant permis sa réalisation. Compte tenu de la distribution spatiale des piézomètres ayant permis sa construction, elle est relativement bien contrainte sur l'emprise de la ZIRA mais beaucoup moins bien contrainte sur l'emprise de la ZT, notamment en direction du Nord, du Nord-Ouest et de l'Ouest. Comme mentionné au §2.2 et 2.3.3, l'étude du comportement hydrodynamique des calcaires du Barrois doit être approfondie. L'ANDRA nous a indiqué (documents transmis en date du 10 juin 2025) : « *Ces travaux de modélisation seront intégrés dans l'étude d'impact à des échéances post-DAC* ».

La carte piézométrique observée de l'aquifère des calcaires de l'Oxfordien montre que la zone de fracturation diffuse est uniquement caractérisée par deux piézomètres EST321 et EST461, ainsi que la source de Rongean. Ce nombre est insuffisant. La relation hydrodynamique entre l'aquifère des calcaires de l'Oxfordien et le réseau hydrographique (rivières de Rongean et de la Marne) pourrait être recherchée. Si le rôle de drain est avéré, la distance entre la ZIRA et cet exutoire pourrait être assez courte. Aussi, il aurait été utile de disposer de plus de piézomètres dans ce secteur, afin de mieux contraindre la morphologie de la surface piézométrique et les échanges de flux d'eau entre l'aquifère, le réseau hydrographique et les formations sous-jacentes dans ce secteur sur un axe transversal à la zone de fracturation.

La carte piézométrique observée de l'aquifère du Dogger (Bathonien) devrait mentionner la date d'acquisition des données, ainsi que la localisation de l'exutoire repéré à Bologne (Pièce 7, Volume 4, Figure 2-5, p.69). Le rôle hydraulique en directions latérales et verticales de la zone de fracturation diffuse pourrait être mieux explicité. L'abaissement de la salinité dans cette zone de fracturation diffuse peut être le résultat : i) d'une recharge par les précipitations et d'une circulation latérale des eaux souterraines plus facile dans la zone de fracturation diffuse, ou ii) de l'apport d'eau souterraine plus douce en provenance

de l'aquifère sus-jacent via le réseau de fractures. Ces deux hypothèses ne sont ni discutées, ni argumentées dans le document.

Les auteur.e.s ont déterminé dans l'aquifère du Dogger : un flux « *de Darcy de 5 km pour 100 ka (0,05 m/an)* » (Pièce 6, Volume 7, p.96). Si une valeur de 40% de la porosité totale est appliquée pour obtenir la porosité cinématique (pour l'aquifère du Dogger, la porosité totale décrite est 0,12 à 0,22, Pièce 6, Volume 7, p.96, soit une porosité cinématique de 0,048 à 0,088) alors la vitesse de pore est de 1 m/an à 0,56 m/an. Au regard de ces données, les valeurs des vitesses de pores calculées par le modèle apparaissent 10 fois inférieures à celles estimées à partir des observations (i.e. : la carte piézométrique pour déterminer le gradient hydraulique, les valeurs de conductivités hydrauliques et de porosités du Dogger). Il est à noter que les valeurs de porosité cinématique utilisées dans le modèle sont au moins d'un ordre de grandeur supérieur à ce qui est mentionné dans la littérature pour les formations carbonatées (Dassargues, 2020). La qualité du calage du modèle et des résultats qui en sont issus posent donc question. De plus, une caractérisation des porosités cinématiques devrait être recherchée, ce paramètre étant essentiel dans le transport d'éléments en solution.

La description des conditions aux limites hydrodynamiques utilisées lors des simulations en régime transitoire est trop peu détaillée pour comprendre comment ces conditions ont évolué au cours du temps. De plus, le pas de temps des simulations sur la période d'un siècle n'est pas mentionné.

3.3.2 Synthèse

Le modèle d'écoulement région-secteur Meuse Haute-Marne (modèle dit « de référence ») à l'actuel et les modèles dits « de prédiction » sur le prochain million d'années et sur un siècle, s'appuient sur une caractérisation insuffisante des trois principaux aquifères : Calcaire du Barrois, Calcaire de l'Oxfordien et Calcaire du Dogger.

En effet, la confrontation entre les données observées et les résultats de simulation est peu convaincante et nécessite une acquisition complémentaire de données :

- **Calcaire du Barrois, de nouveaux piézomètres dans la zone de transposition ZT pour mieux contraindre la carte piézométrique dans les directions du Nord, du Nord-Ouest et de l'Ouest.** S'agissant d'un aquifère qui interagit fortement avec le réseau hydrographique, l'étude des débits de base des cours d'eau et des courbes de récession, notamment en périodes sèches, permettra d'obtenir des données de calibration du modèle hydrogéologique complémentaires.
- **Calcaire de l'Oxfordien, de nouveaux piézomètres dans la zone de fracturation diffuse pour mieux comprendre la relation hydrodynamique entre cet aquifère et le réseau hydrographique, mais également entre cet aquifère et les formations sus et sous-jacentes**
- **Calcaire du Dogger, la caractérisation des porosités cinématiques, paramètre essentiel du transport en solution, doit être recherchée.** En effet, en milieu fracturé, les porosités cinématiques peuvent être extrêmement faibles < 0,001 et conduisent à des vitesses de pores relativement rapides (cf. : Dassargue, 2020, chapitre 8, encart 8.7 page 260). **Explorer la gamme des valeurs de porosité cinématique de ces formations carbonatées est indispensable pour cette démonstration de sûreté.**

4. Modèle d'évolution hydrogéologique sur le prochain million d'années

4.1 Description du modèle d'évolution hydrogéologique sur le prochain million d'années

Le modèle d'évolution hydrogéologique sur le prochain million d'années vise à intégrer les facteurs de contrôle des écoulements sur le très long terme. Il s'agit des contraintes tectoniques, climatiques et géomorphologiques.

Surrection tectonique et activité des failles

Le site appartient à un domaine stable tectoniquement. Il est soumis à un mouvement de surrection variant spatialement qui se traduit par une diminution du pendage des couches. Cette surrection est bornée par deux modèles selon les auteur.e.s (G-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, p.80) : « **un modèle de surrection « maximaliste »**, considéré comme enveloppe de la réalité, dans lequel la surrection est de l'ordre de 80 m/Ma sur le secteur de Meuse/Haute-Marne et dépasse 180 m/Ma au centre de la zone la plus active, située 90 km au Nord-Nord-Ouest du secteur dont le soulèvement relatif détermine l'évolution des pendages. (...) un **modèle de surrection « phénoménologique »** qui différencie la profondeur d'incision des vallées et la hauteur de la surrection tectonique, et tient compte des données nouvelles sur l'évolution géodynamique. Le taux de surrection est de l'ordre de 25 à 30 m/Ma sur le secteur Meuse/Haute-Marne, et de 40 m/Ma au niveau de la zone plus active située au Nord-Ouest. » Sur le prochain million d'années, le jeu des failles n'est pas à écarter, même si selon les auteur.e.s : « aucune fracture nouvelle ne se créera sur la ZIOS et n'affectera la couche argileuse du Callovo-Oxfordien ».

Evolution du climat

Deux scénarii phénoménologiques issus du projet BIOCLIM (2003) ont été retenus par les auteur.e.s (G-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, p.81) : « un scénario d'évolution naturelle du climat (...) prenant en compte le taux actuel de CO₂ dans l'atmosphère » ainsi les cycles glaciaires et interglaciaires se poursuivent ; et « un scénario d'évolution fortement perturbée par les activités humaines (...) hypothèse considérée comme maximaliste sur les rejets de CO₂ au cours des prochains siècles (5000 GT de carbone fossile). » Ainsi une translation du climat vers le pôle chaud s'opère et ne s'amortit qu'au bout de 600 ka à 800 ka.

Evolution géomorphologique

Les deux scénarii climatiques et les taux de surrection « maximaliste » et « phénoménologique » ont permis de définir quatre schémas d'évolution géomorphologique : un scénario d'évolution naturelle du climat et un scénario d'évolution perturbée. Selon les auteur.e.s, l'impact du premier scénario sur la structure géologique concerne : « i) la modification locale des pendages des couches causée par la surrection tectonique différentielle, ii) la réduction des épaisseurs des couches, voire disparition locale de couches, sous l'action de l'érosion, iii) la modification des aires d'affleurement et de la surface topographique sous les actions conjuguées de la surrection tectonique et de l'érosion/sédimentation. » Le modèle d'érosion intègre les processus d'érosion mécanique et ceux d'érosion chimique.

Modèle numérique

Le modèle numérique mis en œuvre pour calculer les évolutions géodynamiques sur l'emprise du secteur n'est pas décrit dans les documents de la DAC, ni dans le document décrivant le modèle d'écoulement de façon plus détaillée (G-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A). Les résultats de ce modèle géodynamique qui concernent les évolutions de la morphologie de la surface et du bâti structural du domaine, servent

ensuite à prescrire les conditions aux limites du modèle hydrogéologique contraint par les évolutions géodynamiques et climatiques GEOAN développé par la Société Golder Associates. Selon les auteurs (G-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, p.86) ce modèle résout : « 1. Les écoulements de subsurface variablement saturés en relation avec les eaux de surface ; 2. Le transport hydro-dispersif des éléments dissous et de la chaleur ; 3. Les écoulements à densité variable induits par la concentration des solutés et par la température de l'eau ; 4. La genèse, l'expansion et le retrait du pergélisol résultant de l'évolution du climat au cours d'un cycle climatique, y compris les périodes glaciaires ; 5. L'effet de la déformation du bâti géologique induite par la surrection tectonique et l'érosion, sur les écoulements des eaux souterraines ; 6. L'effet de la contrainte géomécanique induite par l'érosion. »

Un nouveau maillage aux différences finies est défini à l'échelle combinée région-secteur du bassin de Paris qui s'appuie sur trente-quatre couches géologiques. La condition à la limite de recharge appliquée sur la partie supérieure du modèle est distincte selon que la surface possède une recharge inférieure à la capacité d'infiltration de la formation sous-jacente, ou égale, ou supérieure. Ainsi, dans les deux derniers cas, une partie de la pluie efficace est routée en surface en suivant la ligne de plus grande pente. La simulation en régime transitoire à l'échelle du bassin de Paris intègre des conditions aux limites évolutives dans le temps sur un million d'années. Le pas de temps de simulation est de cent ans. L'analyse des trajectoires de l'écoulement a été calculée à l'aide d'un module de type « *particle-tracking* » grâce à une méthode de résolution purement advective. Les « *particles* » sont injectées instantanément à l'aplomb de la ZIOS. Pour déterminer le temps de parcours de ces trajectoires, deux types de valeurs de porosité ont été attribuées : les porosités totales et les porosités cinématiques correspondantes à 40 % des valeurs de porosités totales.

4.2 Principaux résultats

Les résultats portent tout d'abord sur les évolutions géodynamiques, puis sur l'impact de ces évolutions sur les écoulements souterrains et le transport advectif d'éléments en solution.

Evolution géomorphologique sur le prochain million d'années

Au cours du prochain million d'années, les formations des plateaux sont amincies modifiant ainsi les aires de recharge des aquifères et modifiant leur caractère captif localement. Les vallées de la Marne, de la Saulx et de l'Ornain sont incisées, alors que la vallée de la Meuse se remplit d'alluvions. Selon le scénario, les érosions ou les dépôts sont significativement différents (G-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, Figure 3-4, p.84). À noter, une nouvelle zone d'affleurement de l'Oxfordien calcaire apparaît au NO du site dans la vallée de l'Ornain (G-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, Figure 3-5, p.85).

Evolution des écoulements dans l'Oxfordien et le Dogger sur le prochain million d'années

Scénario phénoménologique

Dans l'Oxfordien calcaire, en considérant le scénario phénoménologique, les directions d'écoulement restent conformes à celles décrites dans la simulation de référence à l'actuel. Les vitesses d'écoulement sont plus rapides en utilisant les porosités cinématiques comparées à celles obtenues avec les porosités totales. Au bout de 400 ka, les vitesses ralentissent car la surrection induit un soulèvement du système aquifère en sens inverse du gradient hydraulique.

Dans le Dogger calcaire, en considérant le scénario phénoménologique, les directions d'écoulement se décomposent en une trajectoire en direction du Nord-Ouest jusqu'à la faille de Marne, puis les trajectoires

se dirigent vers le Sud. Les vitesses sont significativement différentes selon que la porosité totale ou cinématique est prise en compte.

Scénario maximaliste

Dans l'Oxfordien calcaire, en considérant le scénario maximaliste, pendant les périodes glaciaires, le pergélisol (sol gelé) se développe sur une épaisseur de 110 m, ce qui entraîne une quasi-fermeture des aires de recharge. Ainsi, les vitesses d'écoulement sont réduites de 10 à 30% par rapport à la simulation de référence à l'actuel. En utilisant les valeurs de porosité cinématique, l'écoulement se fait en direction du Nord-Ouest vers la faille de Marne, puis l'écoulement est capté par la vallée de l'Ornain, où, suite à l'incision, les calcaires de l'Oxfordien affleurent. L'utilisation des porosités totales ralentit significativement les vitesses d'écoulement et les particules n'atteignent pas les exutoires sur les périodes considérées, c.-à-d. : un million d'années ou sept cent mille ans.

Dans le Dogger calcaire, en considérant le scénario maximaliste, les directions d'écoulement se décomposent en une trajectoire en direction du Nord-Ouest jusqu'à la faille de Marne, puis les trajectoires se dirigent vers le Sud en direction de la rivière le Rognon. Les vitesses et l'amplitude du panache sont significativement différentes selon que la porosité totale ou cinématique est prise en compte.

Conséquences sur les évolutions du gradient de charge hydraulique vertical à travers le Callovo-Oxfordien

Le scénario d'évolution phénoménologique n'entraîne pas de modification de l'emprise de la zone concernée par un flux de drainance ascendant au sein de la ZIOS par rapport à la simulation dite de « référence ». Alors que le scénario d'évolution maximaliste montre qu'au cours du temps la zone concernée par un flux de drainance ascendant au sein de la ZIOS progresse vers le Sud par rapport à la simulation dite de « référence ». Aussi, à l'issue de la simulation, toute la ZIOS est concernée par un flux de drainance ascendant.

4.3 Atouts / points faibles / questionnements

4.3.1 Atouts & Points faibles

L'évaluation de l'évolution des conditions climatiques, géodynamiques et géomorphologiques sur les écoulements au cours du prochain million d'années, représente un travail ambitieux et délicat. Le modèle mis en œuvre pour évaluer l'impact de ces conditions sur les écoulements apparaît très sophistiqué. Cependant, en l'état de la rédaction des documents, il est difficile d'évaluer sa pertinence en termes de physique des processus représentés, des paramètres utilisés ou de leur calibration. Notamment, l'évolution transitoire des écoulements est sensible à la diffusivité (rapport de la conductivité hydraulique au coefficient d'emmagasinement spécifique). Une étude de sensibilité du modèle à ces deux paramètres serait nécessaire.

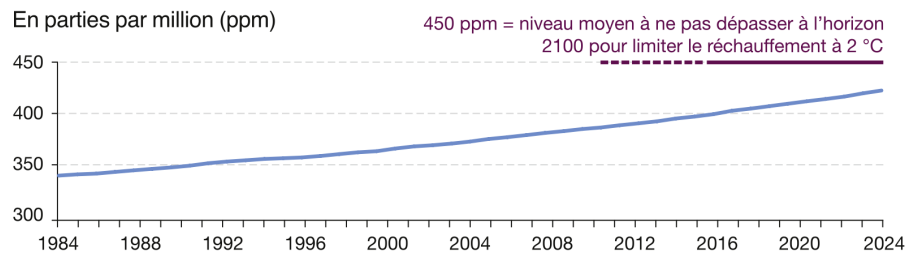
La synthèse des processus géodynamiques externes décrit les phases principales et les effets encourus par le site (Pièce 7, Volume 7, Chapitre 2). Ces processus et effets apparaissent cohérents au regard de la littérature sur le sujet, notamment au vu des évolutions passées. Cependant, les détails des approches conduites, des résultats et des incertitudes ne sont pas présentés. L'impact des modifications géomorphologiques sur les conditions soit de recharge (ablation ou abaissement des plateaux) soit de décharge des aquifères (incision ou alluvionnement dans le réseau hydrographique, ainsi que la modification de leur dynamique passage de méandre à tresses et vice versa) pourrait être mieux décrit.

4.3.2 Questionnements

Lors de la définition des scénarios, certaines hypothèses auraient pu être mieux justifiées ou s'appuyer sur la littérature scientifique plus récente, par exemple :

- À quoi correspond le taux « actuel » de CO₂ atmosphérique, sachant que ce dernier évolue significativement depuis les années 60 (Figure ci-dessous MTEL, 2025), s'agit-il de celui des années 2000 ou de celui de 2024 ?

CONCENTRATION DE DIOXYDE DE CARBONE (CO₂) ATMOSPHÉRIQUE



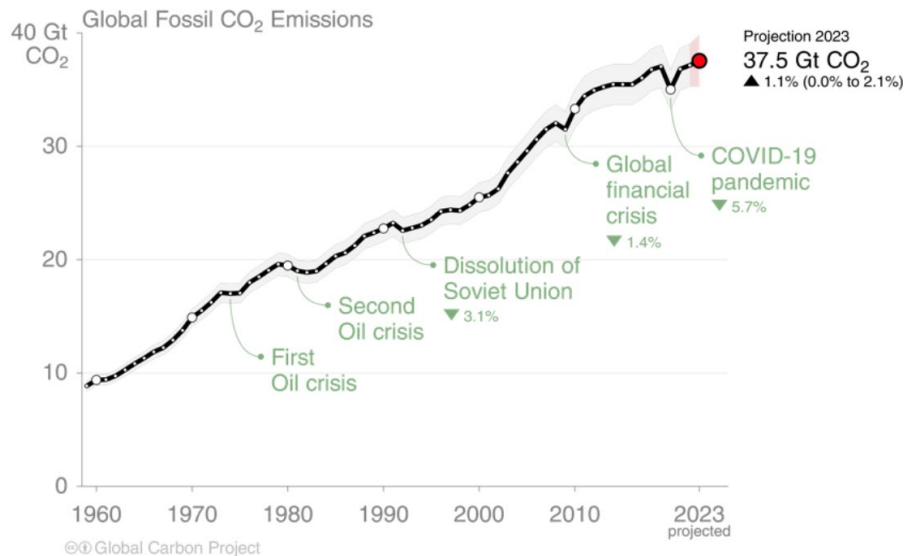
Source : National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA, 2024

A cette question, l'Andra nous a adressé la réponse suivante dans son « mémo_IEER_Climat » en date 10 juin 2025 : « ...Dans les simulations réalisées par le LSCE, le taux en ppm de CO₂ retenu est un taux variable, qui change chaque année. Il était par exemple de 364,1 ppm en 2000 et est de 442,7 ppm en 2024. L'augmentation est un peu surestimée sur les années récentes quand on suit le protocole de BIOCLIM5000 (défini en 2000) et supérieure en 2024 à la valeur proposée (NOAA, USA, 2024) au paragraphe §4.3.2 (p41) du présent document. De façon générale, BIOCLIM5000 a pour vocation d'être un peu enveloppe, voire « maximaliste », mais réaliste. »

Cette précision pourrait être ajoutée au document final.

- L'hypothèse du rejet de 5000 GT de carbone fossile sur les prochains siècles est-elle crédible sachant que les rejets actuels (2023) sont de 37,5 GT (Figure ci-dessous, Friedlingstein et al., 2023) ?

Global fossil CO₂ emissions have risen steadily over the last decades.
Emissions are set to grow again in 2023.



When including cement carbonation, the 2023 estimate is 36.8 ± 2 GtCO₂.

The 2023 projection is based on preliminary data and modelling.

Source: [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

A cette question, l'Andra nous a adressé la réponse suivante dans son « mémo_IEER_Climat » en date 10 juin 2025 : « ...pour l'année 2023 (date de référence de la publication de Friedlingstein et al., 2023), le scénario BIOCLIM5000 propose un rejet de CO₂ dans l'atmosphère de 36,4 Gt de CO₂ identique, au vu des incertitudes et de la barre d'erreurs, à celui de Friedlingstein et al. (2023) estimé par projection à 37,5 Gt de CO₂. L'utilisation du scénario BIOCLIM5000 est donc crédible et en tout point comparable au plus pessimiste des scénarios du GIEC (RCP 8.5) en termes de rejet de carbone dans l'atmosphère et aux projections de Friedlingstein et al. (2023). »

Cette précision pourrait être ajoutée au document final.

- Le réchauffement climatique pourrait conduire à un affaiblissement des circulations océaniques méridiennes de l'Atlantique (AMOC), entraînant un refroidissement brutal de l'Ouest européen d'ici la fin du siècle. Ditlevsen & Ditlevsen (2023) estiment que l'effondrement de l'AMOC se produira vers le milieu du siècle dans le cadre du scénario actuel des émissions futures, cette estimation est faite avec un intervalle de confiance de 95 % entre 2025 et 2095. Cette éventualité d'un climat plus froid à court terme n'est pas discutée. Il apparaît à la lecture des documents de la DAC que ces études d'impact du changement climatique sont relativement anciennes (début des années 2000) et pourraient être mises à jour de façon à prendre en compte les données les plus récentes sur le sujet.

A cette question, l'Andra nous a adressé la réponse suivante dans son « mémo_IEER_Climat » en date 10 juin 2025 : « Concernant l'AMOC et les effets de son arrêt potentiel dans le cadre d'un dérèglement climatique, de notre compréhension, les avis demeurent très partagés dans la communauté scientifique.

Cependant, il est en effet probable que dans le cadre d'un dérèglement climatique, le Groenland fonde couplé à l'arrêt de l'AMOC. La conséquence ne serait pas un refroidissement massif, car la cause toujours

persistante est le réchauffement du climat des hautes latitudes. Les deux phénomènes s'ajoutent donc : un réchauffement global et un refroidissement local. Un arrêt de l'AMOC pourrait ainsi provoquer un refroidissement régional relatif, dans un contexte général de réchauffement, rendant difficile de quantifier l'effet climatique sur l'Europe. La durée de l'arrêt pourrait s'étaler sans doute sur des siècles, voire des millénaires, cela dépendant beaucoup des modèles utilisés. Un arrêt de l'AMOC pourrait entraîner un effet "modérateur" dans l'Atlantique Nord en atténuant le réchauffement par rapport à d'autres régions, ou peut-être un refroidissement modeste. En regards des objectifs de borner l'évolution climatique, ce scénario n'est pas envisagé dans les simulations du climat menées par l'Andra et le LSCE, du fait que les temps d'intérêt considérés de l'ordre du million d'année dépassent très largement celui associé à une perturbation liée à l'arrêt de l'AMOC qui porterait sur quelques siècles, voire un millénaire. Dans le but de consolider ces connaissances sur les évolutions climatiques notamment pour la période d'exploitation de Cigéo, l'Andra continuera de suivre l'évolution des connaissances en incluant notamment les travaux sur l'AMOC. »

A ce stade de la procédure et compte tenu des incertitudes majeures qui demeurent sur l'évolution future du climat, aucun scénario ne peut être écarté et son impact doit être évalué.

Le scénario maximaliste entraîne une modification du flux de drainance ascendant au sein de la ZIOS qui progresse vers le Sud par rapport à la simulation dite de « référence ». Ce résultat pose question en termes de sécurité du site Gigéo.

L'eustatisme (modification du niveau moyen des mers suite à la fonte ou à l'englacement des pôles) n'est pas considéré dans cette étude.

Dans son « mémo_IEER_Climat » transmis en date 10 juin 2025, l'Andra nous a précisé : « *Toutes les études concernant la simulation de l'évolution géomorphologique pour le projet Cigéo ont systématiquement intégré les variations eustatiques et leurs répercussions sur l'ensemble du bassin versant de la Seine. »*

Il serait utile pour la compréhension des résultats que cette précision soit mentionnée dans le document final.

Le rôle de la végétation et de son évolution sur les processus d'érosion/sédimentation et le bilan en eau n'est pas étudié dans cette étude.

Dans son « mémo_IEER_Climat » transmis en date 10 juin 2025, l'Andra nous a indiqué : « *Il est exact que la dynamique d'évolution de la végétation n'a pour l'instant pas été intégrée dans les scénarios d'évolution géomorphologique pour le projet Cigéo. Seules les conditions d'un environnement et d'un couvert végétal ont été appliquées spécifiquement à chacun des biomes identifiés dans les scénarios climatiques. En revanche, cette approche est en cours de développement et sera intégrée dans les prochaines études à venir. Des travaux de cette nature ont été par exemple entrepris dans le cadre du projet FA-VL. »*

Nous comprenons que la complexification des processus pris en compte dans les modélisations soit réalisée ultérieurement.

Afin de mieux apprécier les résultats de l'évolution géomorphologique la même charte de couleur pour la figure 3-4 (G-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002/A, p.84) aurait dû être utilisée. De plus une coupe transversale en direction SE-NO aurait permis de mieux comprendre l'impact de la surrection sur le bâti

structural, notamment le pendage des couches. En effet, ce dernier semble avoir un effet significatif sur la direction des écoulements après 500 ka.

Pour l'aquifère du Dogger, quel que soit le scénario, les trajectoires de l'écoulement au-delà de la faille de la Marne est difficile à comprendre. Une représentation en 3D ou la localisation des failles pourrait aider notamment pour le scénario maximaliste. De plus, les auteur.e.s devraient mieux expliquer le mécanisme qui induit une inversion du gradient hydraulique le long de la faille de la Marne et quel processus est à l'œuvre. Les simulations prenant en compte une valeur de porosité cinématique pour l'évaluation du transport sont plus réalistes, même si les valeurs retenues apparaissent encore assez fortes pour ce type de formation. L'utilisation de la porosité totale pour le calcul du transport en solution dans ce type de formation fracturée ne se justifie pas.

4.3.3 Synthèse

Lors de la mise en œuvre des modèles, l'Andra est encouragée à conduire une étude de sensibilité de ces modèles aux paramètres de la conductivité hydraulique, de l'emménagement et de la porosité cinématique en milieu fracturé. (Voir aussi le chapitre VI ci-dessous.)

5. Modalités de transfert des radionucléides

5.1 Description des modalités de transfert des radionucléides

Au sein des argilites du Callovo-Oxfordien le mécanisme de transport des radionucléides dominant est celui de la diffusion en raison des très faibles conductivités hydrauliques mesurées (10^{-14} à 10^{-13} m.s⁻¹). Le mécanisme d'advection au sein de la couche est conditionné par le gradient hydraulique vertical entre les aquifères de l'Oxfordien calcaire et du Dogger calcaire. Les valeurs et directions de ce gradient sont variables spatialement et évoluent au cours du temps (cf. § 4) et restent très faibles. A noter, les argilites du Callovo-Oxfordien présentent actuellement des surpressions, représentant un excès de charge hydraulique par rapport à celles mesurées dans les formations encaissantes de l'ordre de 50 m. Les vitesses advectives sont estimées de l'ordre du décimètre par million d'années. Au processus de diffusion peuvent s'ajouter des processus de rétention et/ou de transport par des colloïdes. La libération des radionucléides dans l'eau dépend de leur coefficient de solubilité (K_d).

Ces processus de transport vis-à-vis de certaines espèces chimiques ont fait l'objet d'études variées conduites au laboratoire et in-situ et à différentes échelles (carotte, maquette, portion de roche du LS...), afin de caractériser ces processus et quantifier les principaux paramètres (D_0 : coefficient de diffusion dans l'eau libre ; D_e : coefficient de diffusion effectif ; ω : porosité totale) qui les gouvernent. L'effet de l'augmentation de la température sur ces propriétés a été étudié.

5.3 Principaux résultats

Au sein des argilites du Callovo-Oxfordien, selon les auteur.e.s (CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0004/A, p.87) : « 1. Tous les radionucléides autres que les radionucléides mobiles ($K_d = 0$) et à vie longue (principalement ¹²⁹I, ³⁶Cl, ⁷⁹Se) ou peu mobiles (⁴⁰K, ⁴¹Ca), resteront confinés dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien sur le prochain million d'années, soit du fait de leur période, très inférieure au temps de transfert dans le Callovo-Oxfordien, soit du fait de la rétention dans les argilites. 2. Malgré leur sorption nulle, l'iode, le chlore et le sélénium bénéficient du phénomène d'exclusion anionique qui réduit leur mobilité par diffusion en comparaison des espèces neutres ou cationiques. A contrario, les

espèces cationiques dont la mobilité effective est supérieure à celle des espèces neutres ou anioniques, sont essentiellement caractérisées par une rétention élevée réduisant très fortement leur migration. Les temps caractéristiques du transport par diffusion du chlore et de l'iode sont de l'ordre de 300 ka à 700 ka dans le Callovo-Oxfordien. »

Au sein de l'Oxfordien, selon les auteur.e.s (CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0004/A, p.87) : « *le transport en diffusion dominante dans les formations C3a et C3b de l'Oxfordien, le transport horizontal lent et limité dans les horizons poreux de l'Oxfordien (de l'ordre de plusieurs kilomètres tous les 100 ka avec rétrodiffusion des solutés vers le Callovo-Oxfordien), et le transport dans les séries grises de l'Oxfordien, permettent de bénéficier d'une atténuation progressive de la quantité de radionucléides depuis le Callo-Oxfordien jusqu'aux Calcaires du Barrois. »*

Au sein du Dogger, selon les auteur.e.s (CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0004/A, p.87) : « *les écoulements vers l'Ouest et la zone de fracturation diffuse sont sensiblement plus rapides que dans l'Oxfordien, de l'ordre de 10 km tous les 100 ka ; les échanges vers les formations sous-jacentes et le Callovo-Oxfordien sont donc plus limités. »*

5.4 Atouts / points faibles / questionnements

Le document (CG-TE-D-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0004/A) présente de façon très didactique les différents processus et les valeurs des paramètres intervenant dans le transport de radionucléides au sein de la couche hôte et des formations encaissantes. L'effet des surpressions mesurées dans les argilites du Callovo-Oxfordien sur les modalités de transfert des radionucléides bien qu'évoqué n'est pas quantifié. Il serait nécessaire d'approfondir ce point.

6. Recommandations

- Le modèle conceptuel hydrogéologique qui sous-tend la modélisation hydrogéologique régionale n'est pas fondé scientifiquement. En effet, les conditions aux limites retenues, pour les simulations des écoulements à l'échelle du bassin de Paris (model Ground Water) en régime permanent, posent question et entraînent une calibration incertaine des paramètres hydrodynamiques du modèle. Ainsi, l'utilisation des sorties de ce modèle pour prescrire des conditions aux limites réalistes aux modèles dits « de référence » ou « de prédiction » est illusoire. Ainsi, l'amplitude des perturbations hydrauliques qui seront calculées ultérieurement à l'échelle du secteur en prescrivant des conditions aux limites hydrodynamiques issues du modèle régional sera minimisée. Son utilité pose donc question et d'autres choix méthodologiques auraient pu être faits.

Si l'utilisation de ce modèle est maintenue, il est recommandé : i) d'effectuer ces simulations sans prescrire la condition de pompage à l'Albien correspondant à la situation avant exploitation de l'Albien, et de comparer la carte piézométrique obtenue à celle tracée par Raoult (1999) antérieurement à l'exploitation de l'Albien ; ii) de comparer les valeurs de la conductivité hydraulique calibrée aux valeurs de la conductivité hydraulique estimée à partir des essais de pompage sur les formations qui disposent de cette information ; iii) de conduire une simulation en régime transitoire intégrant l'évolution des débits prélevés à l'Albien pour caler les coefficients d'emménagement des formations peu perméables afin de reproduire l'évolution temporelle des charges hydrauliques dans l'aquifère de l'Albien, du Néocomien et du Dogger.

- Le modèle hydrogéologique des calcaires du Barrois a montré ses limites en termes de représentativité de la dynamique du système étudié. S'agissant d'un système karstique, sa conception doit être revue en profondeur et s'appuyer sur de nouvelles données, notamment pour mieux caractériser les écoulements dans le secteur du quart NO de la zone de transposition. Le fonctionnement hydrodynamique des calcaires du Barrois nécessite une étude approfondie qui tienne compte de son évolution à l'état naturel, lors du creusement du laboratoire de recherche souterrain Meuse/Haute-Marne, et sous conditions de changement climatique. De cette analyse pourra découler un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de ce système qui pourra ensuite être adapté à un outil de simulation numérique afin d'être en mesure d'évaluer l'impact du creusement des infrastructures du centre de stockage Cigéo sur le fonctionnement de ce système karstique.
- Les simulations de l'écoulement et du transport advectif à l'échelle du domaine région-secteur ont été conduites en régime transitoire sur une durée d'un siècle et d'un million d'années. Il est recommandé de mieux décrire les conditions aux limites hydrodynamiques utilisées lors des simulations en régime transitoire et leurs évolutions dans le temps. De plus, la comparaison entre les piézométries calculées et observées sur les deux dernières décennies permettrait de s'assurer de la fiabilité de la calibration des paramètres hydrodynamiques du modèle. Il est également recommandé de réaliser une étude de sensibilité du modèle aux paramètres de la conductivité hydraulique, du coefficient d'emménagement et de la porosité cinématique. Les valeurs de ces paramètres présentées dans la DAC concourent à minimiser l'impact de Cigéo. En effet, les porosités cinématiques utilisées pour calculer les vitesses d'écoulement dans les pores de la roche sont trop élevées d'au moins un ordre de grandeur pour des roches carbonatées fissurées. Il en résulte que les vitesses de pores calculées sont d'un ordre de grandeur trop lente. Ainsi l'Andra prévoit une arrivée des radionucléides aux exutoires naturels à l'échéance d'un million d'années, alors qu'une prise en compte de porosités cinématiques plus faibles (d'un ordre de grandeur inférieure, valeur couramment admise dans la littérature pour ces formations carbonatées) permet d'envisager une arrivée des radionucléides aux exutoires naturels à l'échéance de 100 000 ans.
- La zone de facturation diffuse relativement proche de la ZIOS devrait être mieux caractérisée d'un point de vue hydrodynamique car elle constitue un exutoire potentiel aux écoulements sur le long terme.
- Une étude approfondie des conditions climatiques passées à partir des données climatologiques enregistrées localement, à la station de Saint-Dizier (1859 à nos jours) permettrait de mieux caractériser les événements climatiques extrêmes et d'évaluer les modifications de leurs occurrences et amplitudes depuis une trentaine d'années. Les conséquences des modifications du climat sur les systèmes hydrologiques (débits en rivière) et hydrogéologiques (piézométrie des aquifères) doivent également être étudiées avec attention.
- Le rôle des surpressions mesurées dans les argilites du Callovo-Oxfordien sur le transport des radionucléides devrait être approfondi.
- Les résultats présentés dans les documents de la DAC devraient être confrontés à ceux publiés dans la littérature scientifique, cf. exemples cités dans le texte du rapport.

7. Références (Documents consultés ou cités)

AIEA – Revue internationale par les pairs sur le « Dossier d'option de sûreté » du projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde : Cigéo. Novembre 2016, Paris, France.

Complément d'information sur les modèles hydrogéologiques de l'ANDRA pour l'IEER. CG-AMOA-LET-25-0004.

Contoux C., Violette, S., Vivona R., Goblet P., Patriarche D., 2013. How basin model results enable the study of multi-layer aquifer response to pumping: the Paris Basin, France. *Hydrogeology Journal*, 21/3, 545-557, doi:10.1007/s10040-013-0955-6

Dassargues A., 2020. *Hydrogéologie appliquée: Science et ingénierie des eaux souterraines*. Edition Dunod, 512p. EAN : 9782100794348

Ditlevsen P., & Ditlevsen S., Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature communications*. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>

Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Justification des données d'entrée (site). 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. Andra (2022). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002

Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Justification des données d'entrée (site). Le socle des connaissances scientifiques et techniques du centre de stockage Cigéo. Les notes conceptuelles. Le transfert des radionucléides. ANDRA 2022. CG-TE-NTE-AMOA-OBS-0000-19-0004/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 6 – Etude d'impact du projet global Cigéo. Volume 3 – Etat actuel de l'environnement et facteurs susceptibles d'être affectés par le projet. Chapitre 1 à 5. CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-0000-22-0005/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 6 – Etude d'impact du projet global Cigéo. Volume 4 – Evaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences. Chapitre 1 à 5. CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-0000-22-0005/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 6 – Etude d'impact du projet global Cigéo. Volume 7 – Méthodes de réalisation. CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-0000-22-0005/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté. Partie II – Description de l'INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture. Volume 4 – Le site d'implantation de l'INB et son environnement. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté. 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 fermeture. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Gigéo. Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté. Partie III – Démonstration de sûreté. Volume 8 – La démonstration de sûreté après fermeture. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR0-0000-21-0007/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Gigéo. Pièce 8 – Etude de maîtrise des risques. CG-TE-D-ERQ-AMOA-SR0-0000-19-0037/A

Dossier d'Autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Gigéo. Pièce 20 – Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo. CG-TE-D-PDD-AMOA-SDR-0000-19-0002/A

Dupaigne T., Violette S., 2020. Impact de l'activité anthropique et des règles de gestion des eaux souterraines sur la ressource – exemple de l'Albien en Ile-de-France. La Houille Blanche, 1, 16-21, doi:10.1051/lhb/2020003

Friedlingstein P., et al., 2023. Global Carbon Budget 2023, Earth Syst. Sci. Data, 15, 5301–5369, doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023.

Gonçalvès J., Violette S., Robin C., Pagel M., Guillocheau F., Marsily G. De, Bruel D., Ledoux E., 2003. 3-D modelling of salt and heat transport during the 248 My evolution of the Paris basin: diagenetic implications. Bulletin de la Société Géologique de France, 174/5, 429-439.

Gonçalvès J., Violette S., Guillocheau F., Pagel M., Bruel D., Robin C., Marsily G. De, Ledoux E., 2004. Contribution of a three-dimensional regional scale basin model to the study of the past fluid flow evolution and the present hydrology of the Paris basin, France. Basin Research, 16/4, 569-586, doi:10.1111/j.1365-2117.2004.00243.x; (AN 15242309).

Jost A., 2005. Caractérisation des forçages climatiques et géomorphologiques des cinq derniers millions d'années et modélisation de leur conséquences sur un système aquifère complexe : le bassin de Paris. PhD-Thesis UPMC, Paris.

Lauverjat J. 1967. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de l'Albien dans le centre du Bassin de Paris. Thèse de 3^e Cycle. Rapport BRGM/DSGR-A-015.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA, 2024 – Global concentration of CO₂ in the atmosphere from 1984 to 2024.

Raoult Y. 1999. La nappe de l'Albien dans le bassin de Paris, de nouvelles idées pour de vieilles eaux. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI.

Rojas, J. et al. Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger Bassin Parisien, France, rapport final. 242 (BRGM, 1989).

Wei, H. F., Ledoux E., Marsily de, G. Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer, transport in deep aquifers in the Paris bassin. Journal of Hydrology, 120 (1990) 341-358.

VI. Évaluation des propositions de recherche pendant la Phase Industrielle Pilote (Phipil)

Auteurs : Jaak Daemen et Arjun Makhijani

1. Objectifs et description de la Phipil

Si la construction du site est autorisée, le processus de développement de Cigéo consiste en une première phase pilote – appelée « Phase Industrielle Pilote », ou Phipil, suivie (si autorisé) d'un stockage à plus grande échelle des déchets radioactifs à vie longue.

L'Andra a décrit les objectifs de la Phipil en ces termes (Andra 2025, p. 7, références internes omises) :

« 1. Permettre de conforter les données utilisées pour la conception et la démonstration de sûreté du stockage, notamment géologiques, et de procéder à la qualification des différents procédés industriels, notamment de creusement, de scellement, de construction d'alvéoles et d'exploitation. Le recours à des démonstrateurs sera privilégié autant que possible ; cet objectif sera considéré comme atteint avec la confirmation par l'ASN des choix de conception retenus lors de l'instruction de la DAC et lors de la délivrance de l'autorisation de création. »

« 2. Permettre d'approfondir certaines pistes d'optimisation technico-économiques envisagées dans le dossier de chiffrage du projet et au regard du retour d'expérience des premières constructions. Ces éléments feront partie des enseignements à instruire dans le cadre du bilan de la Phipil. »

« 3. Permettre de tester le fonctionnement de l'installation, avec une attention particulière portée aux équipements concourant à la sûreté, à la réversibilité et à la surveillance ; l'atteinte de cet objectif se traduira par le bilan qu'en tirera l'Andra en fin de Phipil, fondé sur l'examen des essais et opérations de stockage menés et de leurs résultats. »

« 4. Être un outil de déclinaison de la réversibilité et permettre de tester en grandeur réelle la capacité de récupérabilité des colis, notamment en situation dégradée. Les opérations complètes de retrait seront testées sur des maquettes de colis puis, si les essais sont concluants, sur des colis réels. Le contenu des essais et leur programmation seront construits dans un processus associant les parties prenantes, de même que les critères d'évaluation de l'atteinte de cet objectif. »

« 5. Constituer une phase d'apprentissage de la gouvernance du projet Cigéo (cf. Action HAMAVL.3). Cet objectif sera satisfait par la démonstration que les objectifs fixés à l'action HAMAVL.3 ont été atteints. »

« 6. Préparer, lors de la fin de la Phipil, les conditions de passage à la phase d'exploitation suivante. »

La partie de l'objectif de la Phipil concernant l'évolution thermique est décrite en ces termes (Andra Pièce 20 2022, p. 105) :

« Par la suite, le suivi de l'évolution thermique et THM du quartier pilote mis en place dès sa réalisation permettra de conforter en situation réelle de fonctionnement et à l'échelle 1, les modèles et les valeurs de paramètres support à ce dimensionnement, déjà établis à plus petite échelle sur la base d'essais et de benchmarks... »

Selon l'Andra, les données obtenues grâce au stockage des déchets HA pendant la Phipil seront importantes pour la conception et le dimensionnement du quartier HA, notamment en ce qui concerne la compréhension de l'évolution thermo-hydro-mécanique (THM) de la roche hôte après la mise en place des déchets HA (Andra Pièce 20 2022, p. 148) :

« En complément de l'optimisation du modèle de comportement THM qui sera retenu pour le dimensionnement du quartier de stockage HA, le suivi du comportement du quartier pilote HA contribuera en tant que de besoin aux progrès de la modélisation thermo-hydro-mécanique et ces derniers pourront permettre d'optimiser la conception de l'architecture du quartier de stockage HA, notamment la valeur de l'entraxe entre les alvéoles (distance séparant deux alvéoles) et le nombre de colis de stockage contenu dans chacun d'eux. »

La figure VI-1 présente les étapes du jalonnement prévisionnel de la Phipil dans le cadre du projet Cigéo :

- Autorisation de construction suivi par la construction de l'INB ;
- Essais pilotes sans déchets radioactifs ;
- Autorisation par l'ASN pour stocker des colis de déchets radioactifs ;
- Essais avec des colis de déchets radioactifs ;
- « Loi fixant les conditions de poursuite éventuelle du stockage ».

Après la phase pilote, la loi pourrait fixer les conditions du stockage ; l'exploitation nécessiterait une étape supplémentaire d'autorisation par l'ASN. La loi pourrait également demander des études supplémentaires ou la fin du processus. Cette dernière option nécessiterait l'élaboration d'une nouvelle voie pour la gestion des déchets HA et MA-VL. Les déchets placés dans la phase pilote seraient récupérés en partie ou en totalité (ANDRA 2025).

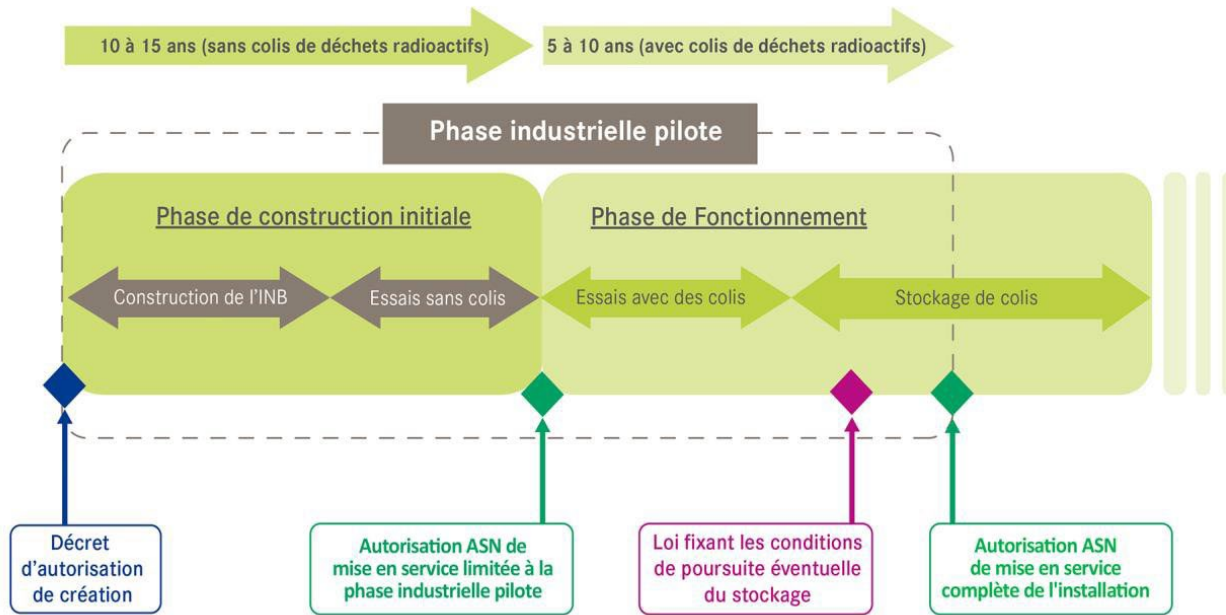


Figure VI-1 : Jalonnement proposé pour la Phipil dans le cadre du projet Cigéo.

Source : Andra Pièce 16 2022, Figure6-2 p. 68

La durée des phases de la Phipil est décrite dans Andra Pièce 16 2022 (p. 68) :

« L'Andra estime que la première partie de la phase industrielle pilote (Phipil), sans colis de déchets radioactifs, pourrait durer de 10 ans à 15 ans et la seconde partie, avec des colis de déchets radioactifs, de 5 ans à 10 ans. La Phipil pourrait donc durer au total entre 15 ans et 25 ans. »

Il s'agit d'un calendrier provisoire, puisque l'Andra a l'intention de préparer un rapport sur les conclusions de la Phipil et les recommandations qui en découleront. Ainsi, « La durée de la Phipil pourra varier en fonction du rythme d'avancement effectif des travaux, en particulier des travaux de creusement des ouvrages souterrains, des mises en équipement des installations et ouvrages, et des essais « en inactif » et « en actif » (Andra 2025, p. 11).

L'Andra note également que la durée de la Phipil « peut également varier en fonction des demandes des autorités ». (Andra 2025, p. 11).

2. Déchets à stocker dans la zone du projet Phipil

Alors que tous les types de déchets actuellement désignés pour être stockés dans Cigéo le seront pendant la période de pleine exploitation, les propositions de l'Andra pour le stockage des déchets pendant la Phipil sont plus limitées. Spécifiquement, l'Andra a déclaré que les déchets « HA et MA-VL » qui seront stockés pendant la Phipil sont « en lien avec la démonstration de sûreté associée » (Andra 2025, p.12). Cependant, l'Andra a exclu certains déchets de cette démonstration de sûreté pendant la Phipil (Andra 2025, p.12, références internes omises) :

« Comme indiqué dans le PDE [Plan directeur d'exploitation], toutes les familles de colis de déchets radioactifs ne pourront pas être stockées dans les ouvrages de l'installation nucléaire construits et exploités pendant la Phipil. Les colis de déchets bitumés, par exemple, ne seront pas stockés en Phipil. Ils feront l'objet d'une procédure d'autorisation ultérieure tout comme les colis HA1/HA2 dont la puissance thermique nécessite une durée d'entreposage avant leur mise en stockage. »

Les déchets de haute activité désignés par le sigle « HA » sont divisés en trois catégories : HA0, HA1 et HA2. Il semble donc que les propositions de l'Andra pour la Phipil ne comprennent que les HA0, qui sont définis comme suit (Andra Pièce EPU6 2024, p. 11) :

« Colis HA0 : la catégorie HA0 regroupe les déchets de haute activité moyennement exothermiques à la mise en stockage. »

Les deux autres catégories de déchets HA sont définies comme suit (Andra Pièce EPU6 2024, p. 11) :

« Colis HA1 : la catégorie HA1 regroupe les déchets de haute activité fortement exothermiques à la mise en stockage. »

« Colis HA2 : la catégorie HA2 se distingue de la catégorie HA1 par une part accrue d'actinides dans les déchets susceptibles de ralentir la décroissance thermique. »

L'Andra prévoit de stocker les déchets HA1 et HA2 pendant la période de pleine exploitation après 2080. L'Andra a déclaré qu'il y aura une section séparée de la zone de stockage HA pour ces déchets (Andra Pièce 16 2022, p. 21, c'est nous qui soulignons) :

« La zone d'implantation des ouvrages souterrains est organisée en trois quartiers d'alvéoles de stockage.... »

« • un quartier pilote HA, pour le stockage de colis...dits « HA0 » ; »

« • un quartier de stockage MA-VL ... »

« • un quartier de stockage HA, pour le stockage de colis de haute activité dits « HA1/HA2 » à l'horizon de 2080 *après entreposage de décroissance thermique*, de colis HA0 et de certains colis de déchets MA-VL vitrifiés, utilisés comme intercalaires. »

L'ANDRA a fourni les estimations suivantes concernant les charges thermiques des différents conteneurs HA (Andra Pièce 7 Partie II Volume 3 2022, p. 91, Tableau 1-1, et Tableau 4-11) :

- HA0, à stocker pendant la Phipil : charge thermique de 50 watts ; 800 colis de type COG-150 issus du retraitement des combustibles usés à l'uranium-molybdène (UMo), provenant des réacteurs à graphite gazeux (UNGG) ;
- HA0 avec une charge thermique de 92,3 watts en 2075 - 2 294 colis de type CEA-1080, provenant du CEA ;
- HA1 : 270 watts après 85 ans de vieillissement – 6 900 colis de type COG-140 ;
- HA1 : 331 watts après 85 ans de vieillissement - 19 010 colis de type COG-800 provenant du retraitement du combustible usé à l'oxyde d'uranium naturel ;

- HA2 : 438 watts après 70 ans de vieillissement - 24 060 colis de type COG-200 provenant du retraitement du combustible usé à l'oxyde d'uranium naturel, du combustible usé à l'oxyde d'uranium réenrichi et du combustible usé MOX.⁴ Il convient de noter que la désignation « F » pour les conteneurs COG-200 signifie que ces conteneurs sont « non encore produits à ce jour mais dont la définition du conditionnement des déchets est déjà bien avancée » :

L'Andra prévoit également de stocker des déchets MA-VL pendant la Phipil, mais en excluant les déchets bitumés, comme indiqué dans la citation ci-dessus. Contrairement au stockage des HA pendant la Phipil, qui se fera dans une zone séparée de la zone principale de stockage pendant l'exploitation du site, le stockage des MA-VL pendant la Phipil n'a pas une zone pilote dédiée (Andra 2025, p.14).

La figure VI-2 illustre la zone de stockage des colis HA pendant la Phipil et les opérations de stockage dans le contexte de l'aménagement de l'ensemble de Cigéo.

⁴ L'Andra précise également que la charge thermique des conteneurs COG-200 sera de 352 watts après 85 ans de stockage (Andra Pièce 7 Partie II Volume 3 2022, p. 91).



Figure VI-2 : Plan d'architecture des ouvrages souterrains montrant : le Quartier pilote HA et les éléments de construction qui lui sont associés, la zone de stockage HA lors de la Phipil

Source : Andra Pièce 20 2022 Andra Pièce 20 2022, Figure 2-30.

3. Evaluation du programme de recherche pendant la Phipil

Le concept de la Phipil est excellent et permettra d'améliorer les perspectives de stockage des déchets pendant la période d'exploitation pour atteindre les objectifs de performance fixés pour Cigéo.

L'Andra semble avoir réalisé des études assez approfondies, à la fois expérimentales et numériques. Par exemple, l'Andra a étudié les conséquences d'une utilisation d'un matériau compressible entre le revêtement et la roche : (Andra Pièce 20 2022, p.77) :

« La conception et le dimensionnement de ce matériau compressible s'appuient sur différentes études concernant le comportement de ce matériau menées au Laboratoire

de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne tant au regard du suivi du comportement de revêtements souples que de celui de revêtements rigides (mortier compressible et voussoir en béton avec une couche de matériau compressible (le voussoir compressible)) ainsi que sur différentes modélisations numériques avec des vérifications des sollicitations dans le soutènement et le revêtement. »

Les études sur la corrosion semblent également impressionnantes. L'Andra a également largement démontré la constructibilité des alvéoles HA, y compris « les études portant sur un matériau de colmatage injecté au niveau de la tête d'alvéole ... réalisée en particulier dans le cadre d'une campagne d'essais dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.... » (Andra Pièce 20 2022, p. 97)

L'Andra dispose d'excellentes propositions pour démontrer la constructibilité des travaux souterrains. Elle a démontré de manière convaincante la faisabilité de la construction d'excavations de la taille requise dans la formation hôte et de leur stabilité (Andra Pièce 20 2022, Section 2.7).

Dans le cadre de la Phipil, l'Andra prévoit des « démonstrateurs » d'alvéoles dans lesquels aucun déchet ne sera stocké (Andra Pièce 16 2022, p. 72). Il s'agit d'un élément important du programme de la Phipil car il permettra de suivre l'évolution de l'environnement des démonstrateurs d'alvéoles parallèlement à celle des alvéoles dans lesquels des déchets seront stockés pendant toute la durée de la phase de stockage des déchets. Ceci permettra de déterminer : (1) la zone endommagée autour de l'alvéole, (ii) le développement hydro-mécanique de la formation hôte du Callovo-Oxfordien, (iii) le comportement mécanique du support. Cette démarche permettra de suivre ces aspects de l'évolution des alvéoles au fil du temps dans les conditions du site en l'absence de déchets, fournissant ainsi des informations fondamentales sur l'impact du creusement.

L'Andra prévoit également de démontrer des performances satisfaisantes des quatre premiers alvéoles de stockage des déchets MA-VL. Cela comprend des tests de démonstration sur l'emplacement des colis de déchets dans les alvéoles et de leur récupération. L'Andra a fourni une description convaincante de ces plans (Andra Pièce 20 2022, Section 2.7.3).

a. La transposition des données

La fracturation et la porosité

Comme discuté au chapitre II, l'Andra a présenté une analyse solide du développement de l'EDZ pendant et peu après l'excavation, y compris le développement de la fracturation et son influence sur le développement de la perméabilité. La modélisation du développement des fractures est particulièrement convaincante. Toutefois deux importantes questions demeurent : (a) la transposition des conclusions relatives aux fractures du laboratoire souterrain à la ZIOS, et (b) l'incapacité de la porosité à revenir à des valeurs proches de celles de la roche saine, y compris dans l'évolution à long terme de l'EDZ avec la production de grandes quantités d'hydrogène résultant de la corrosion des métaux sur des milliers d'années. Ces deux questions ont des implications pour les investigations qui devraient être menées pendant la Phipil.

En ce qui concerne la cicatrisation des fractures, la recherche dans le laboratoire souterrain a démontré que celle-ci dépend fortement de la teneur en minéraux argileux smectites « dès l'arrivée de l'eau » (Andra Socle 2022, p. 527) :

« Dans l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien, qui représente l'essentiel de son épaisseur (environ 2/3) et où sera implantée l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo, les nombreuses observations montrent une capacité de cicatrisation hydraulique de la zone endommagée liée à la présence significative de minéraux argileux smectites...dès l'arrivée de l'eau, jusqu'à tendre progressivement vers celle des argilites saines (non endommagées). Cette cicatrisation hydraulique du fait du gonflement des minéraux argileux est aidée dès lors qu'une contrainte de compression s'exerce sur la fracture, favorisant sa fermeture. »

La composition du Callovo-Oxfordien varie à l'échelle de quelques dizaines de mètres entre la zone USC (unité silto-carbonatée) située au-dessus de la zone de stockage des déchets UA (unité argileuse) et l'UA, si le site est autorisé. De plus, la teneur de l'argile varie dans l'UA de 40% à 60% (Andra Socle 2022, chapitres 2 et 3). La transposition des données du laboratoire à Cigéo nécessite donc des tests pendant la Phipil pour établir le profil vertical de la composition de la roche hôte ainsi que sa variation à travers la ZIOS.

Contrairement à la cicatrisation des fractures, après contact avec l'eau, la taille des pores ne revient pas à l'état proche de la roche saine. De fait, elle « est significativement différente de celle de l'argilite saine, en particulier en termes de taille de pores plus élevée. » (ANDRA Socle 2022, p. 549)

Vu que cette augmentation de la taille des pores a un impact négatif sur la perméabilité, il sera nécessaire de comparer la taille porale dans la zone endommagée dans la ZIOS avec les données déjà obtenues au cours des expériences dans le laboratoire souterrain. Ces tests et ces mesures devraient être menés pendant la Phipil.

Comme discuté au chapitre II, l'évolution de la taille des pores sur de longues périodes reste préoccupante notamment en raison de la production de milliers de tonnes d'hydrogène résultant de la corrosion des métaux. Les tests menés dans la ZIOS pendant la Phipil et dans le laboratoire souterrain devraient fournir suffisamment de données pour réduire les incertitudes dans la modélisation de la performance.

La fracturation et le fluage

Malgré les importantes expérimentations et modélisations des impacts des contraintes déviatoriques, de la température et de l'humidité sur la fracturation et le fluage menées par l'Andra dans le laboratoire souterrain, certaines préoccupations subsistent concernant « le comportement différé à long terme de la zone fracturée » (Andra Socle 2022, p. 498), comme déjà discuté au chapitre II. Par exemple, l'analyse des « breakouts » devrait être approfondie même dans le laboratoire souterrain.

La composition des roches et les valeurs spécifiques des contraintes jouent un rôle dans la fréquence et l'amplitude des fractures ainsi que dans leur évolution dans le temps. Une transposition des données fiable nécessitera une comparaison entre la composition des roches et les valeurs spécifiques des contraintes dans le laboratoire et celles de la ZIOS pendant la Phipil. Plus précisément, nous recommandons de recueillir des données et des preuves convaincantes *in situ* dans la ZIOS, à la

profondeur d'implantation et à proximité de celle-ci, concernant la convergence, le fluage et la profondeur de la roche hôte dans la ZIOS. La réduction des incertitudes liées à la production et à la propagation des fractures et du fluage dans l'environnement spécifique de la roche hôte de la ZIOS est un élément indispensable du travail à accomplir dans le cadre de la phase pilote industrielle.

b. Le maintien de la température du site dans les limites fixées

Le maintien de la température maximale de la roche hôte en dessous de 100°C pendant la période de post-fermeture de Cigéo est un objectif technique d'une grande importance. L'Andra prévoit de maintenir une marge de sécurité de 10°C en dessous de cette limite supérieure. La température maximale de conception de la masse rocheuse à proximité des forages est donc de 90°C.

L'Andra a fourni la description suivante de la relation entre les aspects de l'augmentation de la température dans le quartier pilote HA et le quartier de stockage des colis (Andra Pièce 20 2022, p. 147, c'est nous qui soulignons) :

« L'élévation transitoire de température génère de manière transitoire des déformations, des contraintes thermo-hydro-mécaniques et des surpressions interstitielles dans le Callovo-Oxfordien. »

« Ces processus sont pris en compte dans la conception par des exigences visant à garantir la préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien et, plus particulièrement, à exclure le risque de fracturation en grand du Callovo-Oxfordien en fonctionnement normal. L'Andra a dimensionné *de façon prudente le quartier pilote HA et de façon plus optimisée le quartier de stockage HA*. Ce dimensionnement est contraint par le respect de deux exigences, l'une liée à la température maximale dans le Callovo-Oxfordien et l'autre liée au critère de fracturation mécanique du Callovo-Oxfordien du fait de la mise en charge thermo-hydro-mécanique (THM) associée à une surpression interstitielle. Ce dimensionnement thermique et THM détermine l'extension des quartiers pilote et de stockage HA à travers l'identification de la configuration géométrique (nombre de colis par alvéole et entraxe entre alvéoles) respectant les critères de dimensionnement. »

L'évolution thermique du quartier HA du site pendant la période d'exploitation et dans les décennies suivant immédiatement la fermeture est l'un des aspects les plus critiques à déterminer avec suffisamment de précision pendant la période Phipil. Le stockage de colis HA0 de 50 watts devrait conduire aux conditions suivantes (Andra 2025, p. 44) :

« À l'échelle d'une alvéole de stockage HA du quartier pilote HA »

« • Augmentation progressive de la température jusqu'à des valeurs de l'ordre de 35-40 °C au sein de l'alvéole »

« • Atteinte d'un maximum de l'ordre de 40-45 °C en paroi de colis entre 20 et 30 ans après la mise en place des colis et de quelques °C environ, 10 ans après la mise en place des colis, en tête d'alvéole (figure 5-1). »

La figure IV-2 montre les résultats de la modélisation de l'Andra.

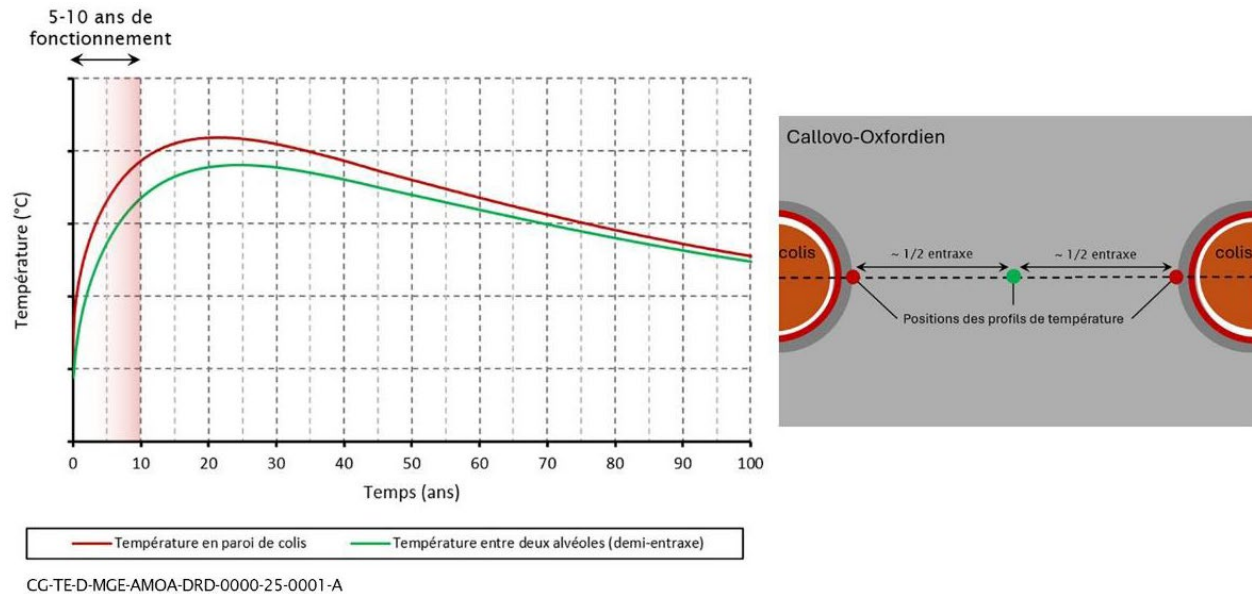


Figure IV-2. « Illustration de l'évolution de la température en paroi de colis (courbe rouge) et entre deux alvéoles (courbe verte) pour une alvéole du quartier pilote HA, depuis la mise en place du colis jusqu'à la fermeture du stockage » (Andra 2025, légende Figure 5-1)

Source : Andra 2025, Figure 5-1.

Les propositions de l'Andra concernant la conception du stockage des principaux types de déchets HA en n'utilisant que les données et la modélisation du stockage des HA de 50 watts dans la phase pilote sont préoccupantes pour plusieurs raisons.

L'Andra ne prévoit pas de stocker de colis HA1 dans la zone pilote de stockage. Les seuls colis HA qui seront testés sont les colis HA0 provenant du retraitement du combustible usé à l'uranium-molybdène d'une charge thermique de 50 watts. Les conteneurs HA1 devraient avoir une charge thermique de 331 watts après 85 ans de vieillissement, soit environ 6,6 fois plus que les colis HA0 qui serviront de base à la génération de données sur la température de la roche hôte au cours de la période Phipil. Les colis HA2 devraient avoir une charge thermique encore plus élevée – 438 watts après 70 ans, soit près de neuf fois la charge thermique de 50 watts des conteneurs HA0 (voir la section VI-2 ci-dessus).

Les propositions actuelles prévoient, suite à l'emplacement des colis de déchets radioactifs HA0, d'exploiter la Phipil pendant 5 à 10 ans (Andra Pièce 16 2022, p. 68). L'Andra anticipe une température maximale « de l'ordre de 40-45 °C en paroi de colis entre 20 et 30 ans après la mise en place des colis et de quelques degrés Celsius environ, 10 ans après la mise en place des colis, en tête d'alvéole ». (Andra 2025, p. 44). L'augmentation de la température n'est pas linéaire, de sorte que le taux initial d'augmentation de la température serait plus important pour ensuite ralentir avant d'atteindre la température maximale. Quelles sont les incertitudes liées à la brièveté du délai actuel, d'autant plus que les données doivent être transposées à un espacement différent pour les colis HA1 et HA2, dont la charge thermique sera de l'ordre de 6 à 9 fois supérieure à celle des colis de déchets d'origine UMo dans le quartier HA pilote ?

L'Andra prévoit de concevoir le dimensionnement du stockage des colis HA0 dans le quartier pilote « de façon prudente », alors qu'elle prévoit de concevoir le stockage pendant la période de fonctionnement « de façon plus optimisée ». Comment le stockage des colis HA0 d'un espacement « prudent » dans la Phipil avec une gamme de température maximale de 40°C à 45°C pourrait fournir suffisamment de données fiables pour concevoir et modéliser de façon sûre un espacement « optimisé » des alvéoles et des colis HA1 et HA2, tout en maintenant l'assurance que l'augmentation de la température dans le quartier HA restera inférieure à 90°C n'est pas évident. L'Andra a mené des essais dans le laboratoire souterrain afin de simuler le stockage des colis HA1 et HA2 et prévoit de mener d'autres essais de même nature (Andra Phipil 2025). Ces données viendront compléter les données obtenues du stockage des colis HA0 dans la zone pilote. Néanmoins, le problème de la transposition des données du laboratoire souterrain vers les zones de stockage HA1 et HA2 dans la ZIOS demeurera.

Au chapitre VII, nous recommandons des essais pour obtenir des données thermo-hydro-mécaniques supplémentaires pendant la Phipil.

Un autre problème concerne l'évolution thermo-hydro-mécanique de la température dans la zone endommagée par l'excavation (EDZ), lorsque la roche hôte n'est pas entièrement saturée. Le Volet technique ne semble prendre en compte que les questions thermo-hydro-mécaniques dans les roches saturées (Andra 2025, p. 44, c'est nous qui soulignons) :

« Au sein du Callovo-Oxfordien, ce dégagement de chaleur entraîne une augmentation de température *dans l'argilite saturée*, engendrant une augmentation de la pression (due à la différence entre les coefficients de dilatation thermique de l'eau et du squelette solide de la roche) et une contrainte thermomécanique due à la déformation thermique. Le dimensionnement thermique/thermo-hydro-mécanique des alvéoles et des quartiers de déchets exothermiques vise à ne pas atteindre un niveau de contraintes pouvant conduire à un endommagement de la roche afin de préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien. »

L'IEER avait soulevé la question de la variation de la conductivité thermique causée par différents niveaux de saturation dans le rapport de 2004 préparé pour le CLIS (IEER 2004, p. 108) :

« Une variation de la saturation causera certainement une variation de la conductivité thermique. L'EDZ est un domaine critique pour la modélisation puisque c'est dans cette zone que le gradient de la température, qui est inversement proportionnel au rayon, est le plus élevé. Cela se traduit par une élévation importante de la température près [de] la paroi de l'alvéole. Par conséquent, l'évolution de la température critique et maximale est principalement affectée par la conductivité de la chaleur dans cette zone. »

La variation des températures et des saturations locales doit être prise en compte, car des régimes d'ébullition et de condensation locaux peuvent se produire même si les conditions moyennes globales sont satisfaisantes. L'IEER l'avait également souligné dans son rapport de 2004 (IEER 2004, p. 117) :

« Une question de modélisation toute aussi importante est l'analyse du développement potentiel d'un mécanisme de conduction-convection-migration de la vapeur-condensation dans le système de la barrière ouvragée et de la zone endommagée

pendant la phase de saturation partielle de l'opération. Il est possible de concevoir un cycle continu de vapeur entre les zones centrales du site, relativement chaudes, et celles éloignées, relativement froides. Bien que le régime de températures, selon la conception de référence, se situe en dessous du point d'ébullition, une température au-dessus de celui-ci n'est pas impossible. Il est tout à fait possible qu'il pourrait se développer un système binaire dans lequel :

1. « soit un régime de températures en dessous du point d'ébullition prévaut si le remblayage et la roche peuvent se re-saturer (et les conductivités thermiques augmentent pour atteindre des valeurs élevées de saturation d'eau engendrant des températures basses) ;
2. « soit un champ de températures au-dessus du point d'ébullition se développe si le remblayage et la roche ne peuvent pas se resaturer (et les conductivités thermiques restent celles du remblayage désaturé et de l'EDZ). »

Dans sa réponse au rapport préliminaire de l'IEER (Andra Phipil 2025), l'Andra n'a pas émis de commentaires sur la question de la variation de la conductivité thermique en fonction des niveaux de saturation.

Finalement, la charge thermique variera probablement d'un colis à l'autre. L'Andra a indiqué qu'aucun colis HA2 n'a encore été produit (voir la section VI-2 ci-dessus). Une variété de déchets de traitement feront partie de cette catégorie ; il est donc raisonnable de s'attendre à ce qu'il y ait une certaine variation de la charge thermique, même sur une base moyenne, pour les colis HA2 provenant de différents combustibles (UOX, URE ou MOX).

En outre, il convient de noter que plusieurs scénarii prévoient la possibilité du stockage de combustibles usés avec des teneurs de charges thermiques différentes : des combustibles usés UNE, ou des combustibles usés URT, ou encore des combustibles usés MOX (voir les tableaux IV-3 et IV-4 au Chapitre IV). Le stockage des colis contenant des quantités considérables de plutonium séparé et/ou d'américium séparé est aussi une possibilité.

Vu la nécessité d'avoir les données qui répondront aux exigences d'adaptabilité, nous avons recommandé des essais supplémentaires pendant la Phipil. Plus précisément, nous avons recommandé une configuration avec des conteneurs dans trois alvéoles placées en parallèle et côte à côte dans la zone pilote qui pourraient être chauffés électriquement afin de produire des données thermo-hydro-mécaniques, y compris des températures pouvant atteindre 90 °C, ce qui permettrait à l'Andra de pouvoir répondre à diverses situations imprévues pendant l'exploitation du site en phase industrielle. (Voir le chapitre VII.)

En résumé, le stockage d'HA pendant la phase pilote est une excellente approche qui pourrait fournir une base scientifique solide pour la conception du quartier HA où des dizaines de milliers de conteneurs seront stockés à terme. Cependant, nous avons des réserves quant aux propositions visant à s'appuyer sur des conteneurs HA0 de 50 watts pour atteindre cet objectif. Les essais menés par l'Andra dans le laboratoire souterrain simulant les colis HA1 et HA2 fourniront des données essentielles qui compléteront celles obtenues du stockage des colis HA0 pendant la Phipil. Cependant, des essais supplémentaires simulant le stockage des colis HA1 et HA2 seront nécessaires dans la zone pilote afin de valider la transposition des données du laboratoire souterrain vers la ZIOS.

Comme nous l'avons indiqué, les questions liées à la saturation devraient également être abordées, notamment en ce qui concerne les variations de la conductivité thermique et, par conséquent, les potentielles variations locales de la température.

c. Le stockage des MA-VL et la Phipil

L'un des points forts des propositions de l'Andra pour une Phipil consiste à démontrer la faisabilité du stockage de différents types de MA-VL au cours de cette période (Andra Pièce 16 2022, p 72) :

« La Phipil est aussi l'occasion de construire des « démonstrateurs » d'alvéoles (HA et MA-VL). Ceux-ci seront construits avec les mêmes méthodes que les autres alvéoles, mais ne seront pas utilisés pour le stockage de colis. Leur construction permettra en premier lieu d'éprouver la qualité des ouvrages réalisés en vraie grandeur et avec les techniques industrielles. Une fois cette validation acquise, la construction des alvéoles destinées à stocker des colis de déchets radioactifs sera alors entreprise. Les démonstrateurs d'alvéole permettront ensuite à l'Andra de conforter sa capacité à surveiller les alvéoles, à maîtriser l'évolution de leur comportement dans le temps et à les exploiter. »

Il y a cependant une exception, comme indiqué ci-dessus. L'Andra n'a pas prévu de programme de stockage de MA-VL bitumé pendant cette période. L'ASN a défini deux options pour ces déchets (CEA, Orano, EDF, Andra 2020, p.3) :

1. « le développement d'un procédé de traitement assurant la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés en préalable à leur stockage ; »
2. « le stockage en l'état des colis avec des évolutions substantielles des options de conception de l'installation de stockage, pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques en cas d'incendie ou d'élévation de température. »

Par ailleurs, l'ASN a clairement exprimé sa préférence pour l'option de traitement (CEA, Orano, EDF, Andra 2020, p. 4) :

« Dans cet avis, l'ASN considère la première voie comme préférentielle et précise que la deuxième voie ne pourrait être retenue que pour des colis de déchets bitumés suffisamment caractérisés pour permettre une modélisation de leur comportement en stockage. »

Un rapport externe d'experts sur la question a été commandé en vue d'examiner les différentes options ainsi que la directive de l'ASN visant à étudier les moyens de prévenir les incendies incontrôlables. L'ASN a ensuite conseillé à l'Andra qu'« il est 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. » (ASN 2020, p. 16)

Pour les besoins de la DAC, l'ANDRA a conservé les deux options : (i) de traitement visant à éliminer le bitume suivi du stockage ou, (ii) le stockage en l'état, après insertion des colis de bitume MA-VL dans des conteneurs en béton « renforcés » vis-à-vis de l'incendie (Andra Pièce 7, Vol. 11, Chapitre 4). Le programme de R&D visant à étudier les options de traitement devrait durer plus de 15 ans (ANDRA

Pièce 20 2022, p. 141). Il semble que le stockage des colis MA-VL bitumés, avec ou sans traitement, ne débiterait que pendant la phase industrielle de l'exploitation de Cigéo. (ANDRA Pièce, vol. 11 2022, chapitre 4).

4. Le changement climatique et la Phipil

L'Andra a mené des travaux approfondis sur le changement climatique et son impact potentiel sur Cigéo. Dans notre rapport de 2004 (IEER 2004, p. 42) nous avons déjà souligné ces travaux dans ce domaine, notamment avec BIOCLIM. L'Andra a poursuivi ses travaux dans ce domaine. Dans cette section, nous nous concentrons sur une question qui nous préoccupait déjà en 2004 pour la période après la fermeture. Désormais cette même question nous préoccupe également pour la période d'exploitation, c'est-à-dire les 150 prochaines années.

La prise en compte par l'Andra des effets du changement climatique pendant la période post-fermeture s'exprime dans deux scénarii :

1. Un scénario d'évolution naturelle, qui correspond à l'état actuel de l'atmosphère dans lequel une partie du CO₂ est imputable aux activités humaines. Le graphique du CO₂ dans le document de modélisation hydrogéologique de l'Andra n'indique que l'Année 0 ; il indique une valeur juste au-dessus de 250 ppm (Andra 2022, pp. 81-82). La valeur en 2022 était d'environ 417 ppm.
2. Un scénario de fortes émissions dans lequel les émissions cumulées de CO₂ au cours des quelques centaines d'années à venir s'élèvent à 5 000 gigatonnes de carbone. Ce scénario correspond approximativement au scénario RCP8.5 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), avec des émissions élevées jusqu'à l'année 2100, constantes pendant le 22^{ème} siècle, et tombant à zéro en 2300 (Andra Climat 2025). Les émissions mondiales de carbone au cours de la période 2022-2024 se sont élevées en moyenne à environ 10 gigatonnes de carbone (environ 37 gigatonnes de CO₂) par an.

Les commentaires de l'IEER sur les aspects post-fermeture figurent au chapitre V. Dans ce chapitre, nous discutons brièvement de ses implications potentielles pour la période d'exploitation du site. et, plus particulièrement, pour la Phipil.

Nous illustrons notre principale préoccupation concernant les risques les plus graves d'évolution du climat au cours des 100 à 150 prochaines années en examinant la littérature récente sur l'arrêt de la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC). Au début de ce siècle, l'arrêt de l'AMOC était considéré comme très improbable ; ce n'est plus le cas aujourd'hui.

L'estimation récente la plus catastrophique se trouve dans un article publié en 2023 par *Nature Communications* ; dans cet article, la meilleure estimation de la date de l'effondrement de l'AMOC se situe vers le milieu du siècle présent, avec un intervalle de confiance de 95 % entre 2025 et 2095 (Ditlevsen et Ditlevsen 2023). Selon un autre point de vue, l'AMOC est résiliente et il est peu probable qu'elle s'effondre au cours de ce siècle, malgré des signes d'affaiblissement (Baker et al. 2025). Enfin, une autre analyse a conclu que, sur la base d'un « signal physique », l'AMOC est « en train de basculer ». Le signal utilisé était « le minimum du transport d'eau douce induit par l'AMOC à la limite sud de

l'Atlantique » (van Westen et al. 2024, traduction IEER). L'article ne précise pas quand l'AMOC pourrait s'effondrer, mais les signaux physiques (y compris la salinité) indiquent un point de bascule imminent, avec la possibilité que l'effondrement se produise rapidement. Une transition rapide de l'état de l'AMOC sur la base de paramètres physiques résultant en un possible effondrement rapide est aussi présentée dans un article publié en 2021 dans *Nature Climate* (Boers 2021, traduction IEER) :

« Les résultats présentés ici montrent donc que le déclin de l'AMOC, récemment découvert au cours des dernières décennies, n'est pas simplement une fluctuation liée à la variabilité climatique à basse fréquence ou une réponse linéaire à l'augmentation des températures. Les résultats présentés suggèrent plutôt que ce déclin pourrait être associé à une perte presque complète de stabilité de l'AMOC au cours du siècle dernier, et que l'AMOC pourrait être proche d'une transition critique vers son mode de circulation faible. »

Selon les plus récentes études scientifiques, un effondrement de l'AMOC pendant la période opérationnelle de Cigéo est un risque important. Spécifiquement, nous adressons les conséquences potentielles, comme celles présentées par van Westen et al. (2024, traduction IEER) pour le climat en Europe (références internes omises) :

« L'effondrement de l'AMOC modifie considérablement la redistribution de la chaleur (et du sel) et entraîne un refroidissement de l'hémisphère nord, tandis que l'hémisphère sud se réchauffe légèrement. Les rétroactions de l'atmosphère et de la glace de mer, qui n'ont pas été prises en compte dans les études de modèles climatiques idéalisés, amplifient encore les changements induits par l'AMOC, ce qui se traduit par un refroidissement très fort et rapide du climat européen, avec des évolutions de température de plus de 3°C par décennie. Par rapport à la tendance actuelle de la température moyenne à la surface du globe (due au changement climatique), qui est d'environ 0,2°C par décennie, aucune mesure d'adaptation réaliste ne peut faire face à des changements de température aussi rapides en cas d'effondrement de l'AMOC. »

Il est important de noter que la latitude de Bar-le-Duc est de 48,77°N, soit environ un degré plus au Nord que Val-d'Or, Québec (et plus de trois degrés plus au Nord que Montréal). Il est bien connu que le principal facteur qui maintient les températures relativement douces en Europe du Nord et de l'Ouest par rapport à des latitudes comparables au Québec est le courant chaud de surface de l'AMOC connu sous le nom de « Gulf Stream ». Il est à noter que même si l'effondrement de l'AMOC se produit avant la fin de ce siècle ou au début du prochain, les conséquences du refroidissement rapide seront ressenties dans Cigéo pendant une grande partie de sa période d'exploitation.

Un examen approfondi et compréhensif de cette question dépasse largement le cadre du présent examen des aspects sélectionnés de la DAC. Mais il est nécessaire de soulever ces questions et d'insister sur la nécessité pour que l'Andra d'envisage sérieusement les conséquences d'un effondrement de l'AMOC au cours de la période d'exploitation.

En réponse à la description, dans le rapport préliminaire de l'IEER, d'un éventuel effondrement du Gulf Stream suite à un changement climatique sévère, l'Andra a déclaré que « L'analyse des risques liés aux conditions météorologiques ou climatiques extrêmes sur la période d'exploitation de l'installation est étudiée au §4.5 du volume 9 de la pièce 7. » (Andra Réponse Chapitre IV, 2025). Cependant, cette

réponse ne tient pas compte des extrêmes qui résulteraient d'un effondrement du Gulf Stream. Elle traite uniquement des questions de conception et des imprévus opérationnels correspondant aux températures extrêmes historiques enregistrées dans la ville voisine de Saint-Dizier (Andra Piece 7, vol. 9, p. 355) :

« Sur la durée de sept jours, les températures chaudes correspondent à la température maximale observée sur une période de retour de 50 ans au niveau de la station météorologique de Saint-Dizier. Les températures froides correspondent à la température minimale observée sur une période de retour de 20 ans au niveau de la station météorologique de Saint-Dizier. Du fait des changements climatiques, les températures auront tendance à augmenter. Ainsi, considérer une température froide extrême de -20 °C pendant sept jours est enveloppe. »

La réponse spécifique de l'Andra concernant l'impact d'un effondrement du Gulf Stream était la suivante (Andra Climat 2025) :

« Cependant, il est en effet probable que dans le cadre d'un dérèglement climatique, le Groenland fonde couplé à l'arrêt de l'AMOC. La conséquence ne serait pas un refroidissement massif, car la cause toujours persistante est le réchauffement du climat des hautes latitudes. Les deux phénomènes s'ajoutent donc : un réchauffement global et un refroidissement local.

« Un arrêt de l'AMOC pourrait ainsi provoquer un refroidissement régional relatif, dans un contexte général de réchauffement, rendant difficile de quantifier l'effet climatique sur l'Europe. La durée de l'arrêt pourrait s'étaler sans doute sur des siècles, voire des millénaires, cela dépendant beaucoup des modèles utilisés. Un arrêt de l'AMOC pourrait entraîner un effet "modérateur" dans l'Atlantique Nord en atténuant le réchauffement par rapport à d'autres régions, ou peut-être un refroidissement modeste. »

Cette réponse n'est pas satisfaisante. Il existe de grandes incertitudes concernant l'impact d'un effondrement de l'AMOC sur l'ampleur et la persistance des températures extrêmes dans la région Meuse/Haute Marne, comme cela est également le cas dans d'autres régions. Notre propos n'est pas de dire que des températures hivernales persistantes bien inférieures à celles enregistrées historiquement à Saint-Dizier vont se produire, mais qu'il existe une possibilité non négligeable qu'une telle éventualité se produise. Cela ne peut pas et ne doit pas être écarté par la simple affirmation suivante : « Un arrêt de l'AMOC pourrait entraîner un effet « modérateur » dans l'Atlantique Nord... ». L'espoir que les effets du réchauffement et du refroidissement puissent se compenser mutuellement ne constitue pas un guide sur la manière dont la conception et la construction de Cigéo devraient être abordées, compte tenu du risque d'effondrement de l'AMOC.

5. Conclusions et recommandations

a. Points forts

1. Le concept d'une Phase Industrielle Pilote est excellent.

2. Les projets de l'Andra concernant la démonstration de la constructibilité, la création d'une zone de stockage séparée pour les déchets HA pour la période de la Phipil, et ses projets de démonstration du stockage de MA-VL de presque tous les types sont judicieux.
3. Le projet de forage d'une alvéole dans laquelle aucun déchet ne sera placé est important et permettra de recueillir des données importantes sur : (i) la zone endommagée autour de l'alvéole, (ii) le développement hydromécanique de la formation hôte du Callovo-Oxfordien, et (iii) le comportement mécanique du support, de la couronne et du fond.
4. L'Andra a fourni une description convaincante de ses projets visant à démontrer la performance satisfaisante des quatre premières alvéoles de stockage des déchets, y compris des essais de démonstration du stockage des colis de déchets dans les alvéoles et de leur récupération.
5. Des ressources considérables ont été consacrées par diverses agences, y compris l'Andra, à l'examen du problème des risques d'incendie associés aux déchets bitumés MA-VL. Une étude externe a été commandée, à la suite de laquelle l'ASN a clairement indiqué que son option préférée était le retraitement de ces déchets, afin d'éliminer le risque d'incendie.

b. Problèmes et lacunes

i. *La température de la roche hôte*

L'IEER a des réserves qui découlent de la décision de l'Andra d'exclure des essais pendant la Phipil qui produiraient des températures atteignant 90°C dans la paroi des alvéoles. Parmi les déchets HA seuls les déchets HA0 issus du retraitement du combustible uranium-molybdène sont inclus dans les projets de stockage de la Phipil. Avec une puissance de 50 watts, ces déchets HA0 ont la charge thermique la plus faible des déchets HA. Les déchets HA1 devraient avoir une charge thermique de 331 watts après 85 ans de stockage.

L'Andra a mené des essais dans le laboratoire souterrain simulant les colis HA1 et HA2 et prévoit de poursuivre ce programme. Toutefois, cela ne répond pas suffisamment à la question de la transposition des données du laboratoire souterrain à la ZIOS.

Pour autant que nous puissions constater, l'Andra n'a pas abordé les questions thermo-hydro-mécaniques résultant des conditions non saturées. Il est aussi important de noter que l'Andra n'a pas abordé ces questions dans des conditions de saturation variables qui pourraient avoir un impact sur la conductivité thermique.

ii. *MA-VL – déchets bitumés*

Il est admis qu'un incendie dans les déchets bitumés constitue un risque. Bien que l'ASN affiche clairement une préférence pour le traitement des déchets bitumés, l'Andra a retenu deux options : (i) un traitement suivi par un stockage et (ii) « un stockage en l'état de colis de déchets bitumés (sans traitement préalable) mis dans des conteneurs en béton « renforcés » » (Andra 2022 Pièce 7 Volume 11, p. 40). Le programme de recherche et développement proposé par l'Andra pour le traitement des fûts des déchets bitumés est d'une durée très longue ; l'Andra envisage « l'arrivée du premier colis sur INB

au-delà de 2050 » (Andra 2022 Pièce 7 volume 11, p. 44; c'est nous qui soulignons). En revanche, le calendrier provisoire de la Phipil envisage une durée de 15 à 25 années (voir la Figure VI-1 ci-dessus). Il apparaît que l'Andra ne sera pas en mesure de fournir les informations critiques aux décideurs au moment où ceux-ci devront prendre les décisions pour les prochaines étapes du projet Cigéo – c'est-à-dire l'étape de la phase d'exploitation industrielle. Ce décalage entre les calendriers prévus est préoccupante, vu le nombre important de colis de déchets bitumés (plus de 40 000 mille) qu'il faudra entreposer et la question de sûreté très importante sur le risque d'incendie lié à ces colis s'ils ne sont pas traités avant leur entreposage.

iii. Incidences du changement climatique pendant la période opérationnelle

La situation climatique s'étant aggravée au cours des deux dernières décennies, la littérature scientifique indique que le risque d'un effondrement de l'AMOC au cours du 21^e siècle est beaucoup plus important que les estimations faites il y a seulement deux décennies. Bien qu'il y ait des divergences et des incertitudes sur la question de savoir si un tel arrêt se produirait au cours de ce siècle, il y a des indications physiques claires que le système est proche d'un point de non-retour et que l'arrêt pourrait se produire rapidement. Il est à noter que même si un arrêt de l'AMOC ne se produit pas au cours de ce siècle, la période opérationnelle de l'ANDRA se situant au-delà du milieu du prochain siècle, le risque encouru s'accroît. Le fait que l'Andra n'ait pas pris en compte les risques d'un arrêt de l'AMOC qui pourrait gravement compromettre les modalités de construction d'un site de stockage et d'enfouissement des déchets sur une période de plusieurs dizaines d'années est une préoccupation majeure. La réponse de l'Andra au rapport préliminaire de l'IEER sur cette question est insuffisante et peu crédible. Espérer qu'un effet de refroidissement résultant de l'effondrement de l'AMOC puisse modérer les effets du réchauffement n'est pas une hypothèse pertinente pour programmer une période d'exploitation qui dépassera le milieu du 22^{ème} siècle. Cette position sous-entend que la question des hivers beaucoup plus froids que les plus froids jamais enregistrés à Saint-Dizier peut être ignorée dans la conception de Cigéo. L'IEER réitère sa recommandation à ce sujet dans la section suivante. Un espoir ne peut pas et ne doit pas remplacer l'analyse fondée scientifiquement d'une éventualité aussi grave.

iv. Transposition des données

Il reste un travail considérable à faire dans le laboratoire souterrain et dans la ZIOS pendant la Phipil pour assurer une transposition des données fiables en ce qui concerne la cicatrisation des fractures, la taille des pores dans la zone endommagée et son évolution au fil du temps, ainsi que la fracturation et le fluage.

c. Recommandations

i. Transposition des données et les tests pendant la Phipil

- La transposition des données du laboratoire à Cigéo en ce qui concerne la cicatrisation des fractures nécessite des tests pendant la Phipil pour établir le profil vertical de la composition de la roche hôte ainsi que sa variation à travers la ZIOS.
- Étant donné que l'augmentation de la taille des pores a un impact négatif sur la perméabilité, il sera nécessaire de comparer la taille porale dans la zone endommagée de la ZIOS avec les données déjà obtenues lors des essais menés dans le laboratoire souterrain. Ces tests et ces mesures devraient être menés pendant la Phipil.
- L'évolution de la taille des pores sur de longues périodes reste préoccupante notamment en raison de la production de milliers de tonnes d'hydrogène résultant de la

corrosion des métaux. Les tests menés dans la ZIOS et dans le laboratoire souterrain devraient recueillir suffisamment de données pour réduire les incertitudes dans la modélisation de la performance.

- Une comparaison entre la composition des roches et les valeurs spécifiques des contraintes dans le laboratoire et la ZIOS pendant la Phipil est recommandée. Plus précisément, nous recommandons de recueillir des données et des preuves convaincantes *in situ* dans la ZIOS, à la profondeur d'implantation et à proximité de celle-ci, concernant la convergence, le fluage et la profondeur de la roche hôte dans la ZIOS. La réduction des incertitudes liées à la production et à la propagation des fractures et du fluage dans l'environnement spécifique de la roche hôte de la ZIOS est un élément indispensable du travail à accomplir dans le cadre de la phase pilote industrielle.

ii. Déchets HA

Pour obtenir l'autorisation de stocker les déchets, la démonstration devrait comprendre les éléments suivants :

- L'Andra devrait étudier des colis thermiques non radioactifs avec des charges thermiques équivalentes à celles des colis HA1 et HA2 afin d'obtenir des données qui complètent les essais qu'elle a menés et qu'elle continuera de mener dans le laboratoire souterrain. Les essais recommandés au chapitre VII sont nécessaires pour obtenir les données permettant de garantir la fiabilité de la transposition des données du laboratoire souterrain à la ZIOS.

- Le recueil des données et la modélisation de l'Andra devraient inclure les variations de conductivité thermique en raison des différents niveaux de saturation de la roche hôte.

iii. Déchets MA-VL bitumés

Étant donné les risques posés, surtout le risque d'incendie et d'emballement des réactions exothermiques, ainsi que le nombre important de colis de déchets bitumés, l'Andra devrait coordonner le calendrier de la R&D pour le traitement des fûts de ces déchets et celui de la Phipil. Aujourd'hui, le décalage entre les deux calendriers indique qu'à la fin de la Phipil l'Andra probablement ne sera pas en mesure de fournir aux décideurs des informations critiques concernant ces déchets.

iv. Changement climatique

L'Andra devrait évaluer l'éventualité d'un arrêt de l'AMOC plusieurs décennies avant la fin de la période d'exploitation du site. Une date comprise entre 2050 et 2100 pourrait être choisie, après consultation avec des experts du climat dans ce domaine. Un scénario avec des hivers beaucoup plus rigoureux que ceux indiqués par les données historiques à Saint-Dizier devrait être examiné afin d'évaluer ses conséquences potentielles pendant la phase opérationnelle. Dans ce contexte, l'Andra devrait répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les implications pour Cigéo de la déclaration brutale de van Westen et al. (2024) selon laquelle des mesures d'adaptation réalistes ne seront pas possibles ?
- Sera-t-il possible d'exploiter le site ? Par exemple, les voies ferrées à l'intérieur de Cigéo seront-elles encore exploitables ?
- La roche d'accueil se fracturera-t-elle gravement sous l'effet des cycles de gel et de dégel ?

- Dans quelle mesure les gaines métalliques dans lesquelles sont insérés les colis se contracteront-elles au cours d'un hiver très rigoureux dans des conditions beaucoup plus froides ?

- La récupérabilité peut-elle encore être considérée comme une option réaliste ?

- Une démonstration de la récupérabilité au cours de la période Phipil serait-elle encore valable dans une situation post-effondrement de l'AMOC ?

L'Andra devrait aborder ces questions dans le cadre d'une révision de la DAC que nous recommandons également pour d'autres raisons. Elles sont essentielles pour examiner de quelle manière la conception et la construction du site de stockage devraient tenir compte des conséquences d'un arrêt de l'AMOC, si celui-ci devait se traduire par des hivers beaucoup plus rigoureux que ceux que la région Meuse-Haute Marne a connus jusqu'à présent.

6. Références

Andra 2025. Objectifs et critères de réussite de la phase industrielle pilote - Volet technique (Action HAMAVL.6 - Article 36 de l'arrêté du 09.12.22 d'application du PNGMDR), 31 janvier.

Andra Climat 2025. Compléments techniques relatifs à l'évolution climatique, envoyé à l'IEER via le Clis, 10 juin.

Andra Phipil 2025. Programme d'essais et de modélisation en support à la réalisation du quartier pilote HA en phase industrielle pilote (Phipil). Sent to IEER via the Clis, 10 juin.

Andra Réponse Chapitre IV 2025. Andra Remarques IEER-IV_Phipil. 10 juin.

Andra Pièce EPU6 2024. Dossier d'Enquête Publique, Pièce EPU6, Glossaire et acronymes. Décembre.

Andra 2022. Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Justification des données d'entrée (site). 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. Document N° CG-TE-D-NTE-AMOA-GEO-0000-20-0002. Décembre.

Andra Inventaire Référence 2022. Documents techniques support au dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Justification des données d'entrées (Colis) : Inventaire de référence retenu pour la conception et la démonstration de sûreté de l'INB Cigéo au stade des études d'avant-projet. Décembre.

Andra Pièce 0 2022. Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo : Présentation non technique, Pièce 0. Décembre.

Andra Pièce 7 Partie II Volume 3 2022. Dossier d'Autorisation de Création d'une Installation Nucléaire de Base : Pièce 7 - Version Préliminaire du rapport de sûreté, Partie II : Description de l'INB, de son environnement et de son fonctionnement et évolution du système de stockage après fermeture ; Volume 3 : Les colis de déchets. Décembre.

Andra Pièce 7 Partie III Volume 9 2022. Dossier d'Autorisation de Création d'une Installation Nucléaire de Base : Pièce 7 - Version Préliminaire du rapport de sûreté, Partie III - Démonstration de sûreté : Volume 9 : La démonstration de sûreté en exploitation. Décembre.

Andra Pièce 7 Partie IV Volume 11 2022. Dossier d'Autorisation de Création d'une Installation Nucléaire de Base : Pièce 7 - Version Préliminaire du rapport de sûreté, 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. Décembre.

Andra Pièce 16 2022. Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo : Plan directeur de l'exploitation, Piece 16. Décembre.

Andra Pièce 20 2022. Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo : Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo. Décembre.

Andra Documents Support 2022. Document Techniques Support Au Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Justification d'Entrée Colis : Inventaire de Référence Retenu pour la conception et la démonstration de sûreté de l'INB Cigéo au stade des études d'avant-projet, décembre.

Baker, J.A. et al. 2025. "Continued Atlantic overturning circulation even under climate extremes, *Nature*, Vol. 638, February 27. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08544-0>

Boers, Niklas. 2021. "Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation", *Nature Climate Change*, Vol. 11, August. <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01097-4>

CEA, Orano, EDF, Andra. 2020. Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2016-2018, Article 482 : Evaluation Comparée des Différents Modes de Gestion Envisagées pour les Déchets Bitumés. Janvier.

Ditlevsen, Peter and Susanne Ditlevsen 2023. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation, *Nature Communications*, Vol. 14, July 25. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>

Doroszczuk, Bernard et al. 2020. Avis no 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), Autorité de Sûreté Nucléaire. 1 décembre.

Revue Externe 2019. Revue externe sur la gestion des déchets bitumés : Rapport final, juin. <https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Rapport-final-revue-dechets-bitumes>
<https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Rapport-final-revue-dechets-bitumes>

van Westen, René M., et al. 2024. "Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course", *Science Advances*, February 9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>

VII : Essais thermiques menés pendant la phase pilote pour définir la conception de la phase industrielle

Auteur : George Danko

La phase pilote du projet Cigéo constitue la première phase du projet de construction d'un site d'enfouissement pour les déchets nucléaires radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue. Cette phase a pour objectif de : (i) conforter les méthodes de construction en plaçant des déchets nucléaires de haute et moyenne activité à vie longue dans une zone d'essai, et (ii) recueillir des données au sein de cette zone afin de vérifier les modèles relatifs à la conception et à la construction du site pendant la phase industrielle.

Un aspect important de la phase pilote consiste à étudier les changements thermo-hydro-mécaniques dans la roche hôte résultant du dégagement de la chaleur émise par les colis de déchets de haute activité suite à la désintégration nucléaire. L'installation dans la phase industrielle accueillera trois types de colis à haute activité : HA0, HA1 et HA2. Cependant, pendant cette phase pilote, seuls les colis HA0, dont la charge thermique est la plus faible, sont désignés pour être stockés et testés, notamment pour leurs impacts thermomécaniques.

L'objectif de la zone d'essai pilote est d'être représentative de tous les types de colis, comme l'indique l'Andra (Andra Objectifs 2025, p. 55) :

« L'existence même de la Phipil et le fait qu'elle comporte elle-même une logique de progressivité (phase de construction initiale puis une phase de fonctionnement sur une durée limitée) répond en soi à l'objectifs de déploiement progressif. »

« À ce titre, la construction et l'exploitation du quartier pilote HA dès la Phipil, permet de disposer d'un retour d'expérience précieux pour la définition technique, la construction, l'exploitation du quartier de stockage HA qui sera mis en œuvre à l'horizon 2080. »

La phase PhiPil est prévue en deux étapes. La période de construction initiale durera entre cinq et dix ans sans stockage de déchets radioactifs. La deuxième période durera de 10 à 15 ans ; elle impliquera le stockage de déchets radioactifs et la collecte de données pertinentes pour la conception du stockage des déchets pendant la phase industrielle. (Voir le chapitre VI.)

Le problème est que les résultats de la phase Phipil obtenus tels qu'ils sont actuellement proposés seront insuffisants pour la conception de la phase industrielle en ce qui concerne les performances thermo-hydro-mécaniques de cette dernière. Plus précisément, les données thermo-hydro-mécaniques ne seront pas suffisantes pour une extrapolation sûre à l'ensemble du site.

L'Andra a décrit le stockage des colis HA0 comme suit (Andra Objectifs 2025, c'est nous qui soulignons) :

« Les colis « HA0 » du quartier pilote HA sont moins exothermiques que les colis HA destinés au quartier de stockage HA, mais leur mise en stockage sera caractérisée par un même processus d'élévation de température. Ils doivent également respecter la même exigence de préservation des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien, en garantissant une température maximale dans la roche en dessous de 100°C. La température maximale attendue dans les alvéoles du quartier pilote HA est un peu plus

faible que celle attendue dans les alvéoles du quartier HA mais suffisamment élevée pour être représentative du processus d'évolution des alvéoles HA et du Callovo-Oxfordien environnant, ainsi que des opérations de mise en stockage et de retrait. »

La déclaration en italique est surprenante. La limite de température est « de 100 °C au contact des argilites » avec « une marge de 10 °C afin de garantir le non-dépassement de la limite de 100 °C » (Andra juin 2025). Cela permettra de s'assurer qu'il n'y aura pas d'ébullition après le stockage des déchets. Mais la température maximale de conception pour les colis HAO dans la Philpil n'est que de 40°C à 45°C (Andra Objectifs 2025, figure 5-1 et p. 44).

L'Andra prévoit de placer uniquement des colis HAO dans la zone pilote. La figure VII-1 illustre la configuration envisagée du stockage dans un alvéole de la zone pilote.

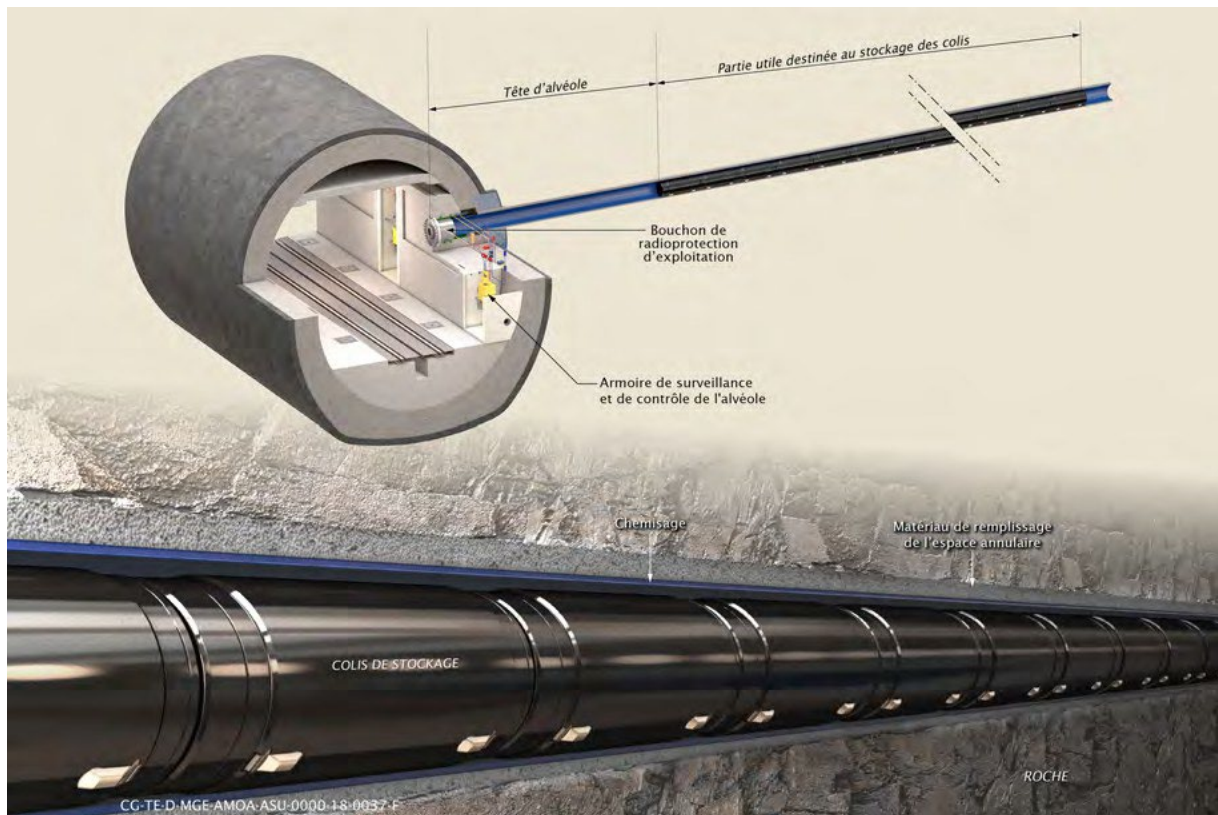


Figure VII-1 : Illustration d'un forage et de conteneurs HA dans la zone pilote.

Source : Andra Pièce 20 2022, figure 2-31.

Comme indiqué au chapitre VI, les colis HA2 n'ont pas encore été produits. Les colis HA1 existent en quantité suffisante, mais nécessitent une période de refroidissement prolongée avant de pouvoir être stockés dans Cigéo. La charge thermique des colis HAO qui seront stockés dans la zone pilote n'est que de 50 watts environ, alors que celle des colis HA1 et HA2 est plus de 300 watts et plus de 400 watts respectivement. Ces derniers proviendraient du retraitement du combustible MOX avec une chaleur de décroissance et une dépendance temporelle différentes de celles des déchets nucléaires HAO.

L'Andra a mené des essais simulant les charges thermiques des colis HA1 et HA2 dans le laboratoire souterrain et prévoit de mener d'autres essais pour compléter les données qui seront générées par le stockage des conteneurs HAO pendant le Phipil :

« Plusieurs essais de chauffe ont été réalisés au laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (Armand *et al.*, 2017). Ces essais avaient pour objectif i) d'étudier le comportement THM de la roche, ii) de comparer les résultats des essais *in situ* à ceux obtenus en laboratoire sur échantillon (pour par exemple identifier un potentiel effet d'échelle) et iii) de développer les modèles de comportement THM. La température visée au chemisage était de 90 °C au regard du critère de dimensionnement thermique retenu pour le dimensionnement du quartier de stockage HA dans le projet Cigéo....

« Pour préparer le quartier pilote en Phipil, le programme expérimental se poursuit au laboratoire avec la mise en place de nouveaux démonstrateurs d'alvéole HA représentatifs des alvéoles du quartier pilote (partie utile et tête d'alvéole), qui seront chauffés sur une distance comprise entre 10 m et 80 m. Des configurations avec deux alvéoles chauffées côte à côte avec des entraxes de l'ordre de 6 m (entraxe très inférieur à ceux du quartier de stockage qui atteignent plusieurs dizaines de mètres), seront testées. Les puissances thermiques envisagées couvrent le cas des déchets HAO du quartier pilote et des déchets HA1/HA2 du quartier de stockage HA. Il est également envisagé sur un des démonstrateurs, après une phase de chauffe représentative de celle des alvéoles des déchets HA1/HA2, d'augmenter la puissance thermique pour atteindre les 100 °C dans la roche. Au final, au moins 5 nouveaux démonstrateurs de chauffe seront installés d'ici 2030 (quatre de 80 m de longueur et un de 30 m de longueur) pour des durées de chauffe minimales de 5 ans. »

Ces essais fourniront une majeure partie des données nécessaires à la conception du stockage des colis HA1 et HA2 pendant la phase industrielle de l'exploitation de Cigéo. Cependant, la question d'une transposition fiable des données du laboratoire souterrain vers la ZIOS reste ouverte. Nous proposons des essais complémentaires dans la zone pilote HAO de la ZIOS pour répondre à cette question.

1. Méthode proposée

La phase pilote devrait être conçue de manière à recueillir des données nécessaires pour la conception de la phase industrielle du site, avec pour objectif que la température ne dépasse pas 90 °C. Pour cela, nous proposons que plusieurs colis, de même diamètre que les vrais colis, surveillés et contrôlés (conteneurs SC), ne contenant aucun matériau radioactif, mais compatibles avec les composants des colis HA soient placés en série dans des alvéoles de la zone d'essai pilote, avec des colis HAO de chaque côté. Les conteneurs SC ne contiendraient que des matières non radioactives présentant des propriétés de densité et de conductivité similaires à celles des colis HA1 et HA2. L'environnement rocheux autour des conteneurs SC serait surveillé afin de détecter les effets thermo-hydro-mécaniques de l'essai.

Il est proposé que les conteneurs SC soient chauffés électriquement de manière réglable, surveillés en température et conformes aux normes de stockage lorsqu'ils sont placés dans l'ordre souhaité dans la zone d'essai pilote.

Plusieurs alvéoles de ce type contiendraient les colis HA0 dans la zone pilote ; il y aurait également trois alvéoles de contrôle, comme le montre la figure VII-2.

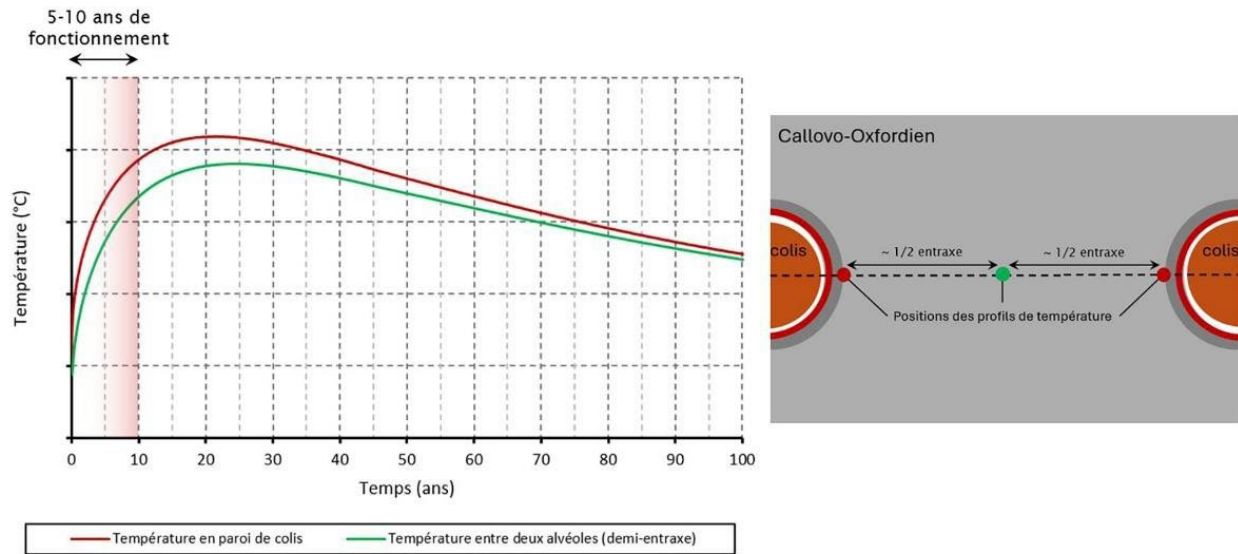


Figure VII-2 : Zone pilote HA

Source : Figure 2-30 : ANDRA Pièce 20 2022.

Le profil de température entre les alvéoles est illustré à la figure VII-3. Deux courbes sont représentées : l'une à proximité de l'alvéole et l'autre au point médian entre deux alvéoles. La température maximale dans la masse rocheuse à proximité des forages devrait se situer entre 40 °C et 45 °C ; elle serait atteinte dans un délai de 20 à 30 ans. Selon l'Andra les trois forages de contrôle ont les fonctions suivantes :

- « alvéole témoin 1 : suivi de la déformation du chemisage (par exemple, par campagne de mesures tridimensionnelles) ; »
- « alvéole témoin 2 : suivi de la déformation du chemisage (par exemple par cannes de convergence) ; »
- « alvéole témoin 3 : suivi de la corrosion des aciers des colis et du chemisage. »



CG-TE-D-MGE-AMOA-DRD-0000-25-0001-A

Figure VII-3 illustrant l'évolution de la température dans le temps

Source : ANDRA 2025, figure 5-1.

Nous proposons que l'Andra installe des conteneurs surveillés et contrôlés (conteneurs SC), équipés d'un système de chauffe électrique, afin de simuler le champ de température dans la roche hôte autour des colis HA1 et HA2. La chauffe de chaque conteneur SC serait contrôlée de manière à maintenir la température à proximité de l'alvéole juste en dessous de 90 °C. Il n'est pas nécessaire que toutes les alvéoles soient soumises à cet exercice. Nous proposons un nombre suffisant d'alvéoles en série dans trois alvéoles parallèles pour permettre la simulation des conditions thermo-hydro-mécaniques radiales et longitudinales qui simulerait les colis HA1 et HA2. La figure VII-4 illustre le système de chauffe proposé dans la zone d'essai pilote pour trois rangées d'alvéoles avec des conteneurs dont la température est réglée et contrôlée afin de simuler les effets prévisibles des colis HA1 et HA2 dans le Callovo-Oxfordien.

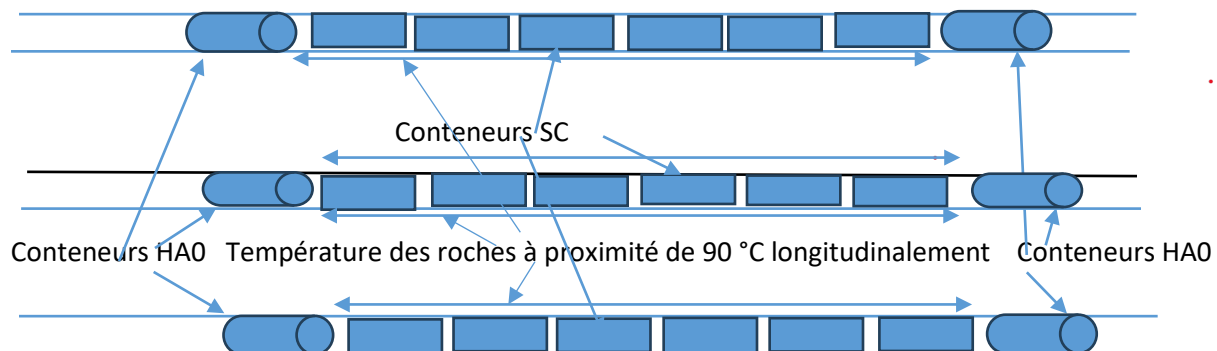


Figure VII-4. Proposition de projet avec des conteneurs simulateurs chauffés électriquement, surveillés et contrôlés, par exemple six en série dans chaque alvéole (moins ou plus si nécessaire), en fonction des résultats des simulations thermiques menées préalablement pour atteindre un champ de température

de charge proche de la ligne dans la zone centrale indiquée sur la figure. Ces conteneurs sont placés entre les colis HA0 dans trois alvéoles adjacents.

Une simulation numérique devrait être effectuée afin de vérifier comment la chauffe des conteneurs SC devrait être contrôlée de manière optimale dès le premier jour de leur mise en place dans la zone d'essai pilote, ce qui permettrait de chauffer la masse rocheuse dans le champ proche de 90°C. Une surveillance appropriée des paramètres thermiques, mécaniques et hydrauliques serait effectuée afin de collecter des données pour la modélisation et la conception des zones HA1 et HA2 dans la phase industrielle.

2. Recommandations

- i. Nous recommandons expressément que la température de la roche soit mesurée et d'autres paramètres thermo-hydomécaniques et chimiques à l'aide des conteneurs SC placés dans la zone d'essai afin de caractériser le site pendant un projet de chauffe accélérée atteignant une température inférieure à 90 °C. La simulation numérique du projet de chauffe accélérée dans la zone pilote peut être utilisée pour calibrer les constantes du modèle numérique afin de soutenir la conception des phases futures du site en simulant la réponse hydrothermique pour l'emplacement futur des colis HA1 et HA2. À partir des mesures de surveillance et de la simulation, les propriétés du site peuvent être évaluées (conductivité thermique effective et humide/sèche, diffusivité thermique, chaleur spécifique, perméabilité hydraulique, etc., toutes en fonction de la température jusqu'à 90°C).
- ii. Nous recommandons d'utiliser des conteneurs SC chauffés électriquement pour atteindre rapidement une température proche de 90°C au cours des 10 à 20 premières années avec pour objectif d'étudier les effets dynamiques de la variation de température. Les conteneurs SC seraient placés dans trois alvéoles adjacents, la rangée du milieu atteignant la température la plus élevée et la plus représentative de l'environnement estimée à 90 °C dans la zone pilote illustrée à la figure VII-4 ci-dessus.

Nous nous attendons à ce que les essais avec des conteneurs SC conduiront au développement de signatures thermomécaniques et hydrauliques significatives aux alentours de 90 °C, ainsi qu'à une caractérisation adéquate de la distribution de l'humidité et de la vapeur dans les fractures pour être en mesure de simuler les colis HA1 ou HA2 dans la zone pilote, si possible pour une période de 10 à 20 ans et même plus si nécessaire. Ces données compléteront celles qui ont été et seront générées lors des essais menés dans le laboratoire souterrain et garantiront leur transposition adéquate dans la ZIOS.

3. Références

Andra Objectifs 2025. Objectifs et critères de réussite de la phase industrielle pilote - Volet technique, 31 janvier.

Andra juin 2025. Le comportement thermo-hydomécanique (THM) du Callovo-Oxfordien autour des alvéoles de stockage de déchets HA. Mémoire envoyé à l'IEER juin 2025.

Andra Pièce 20 2022. Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo. Décembre.