ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Monsieur le Directeur de la direction des déchets,
des installations de recherche et du cycle

Fontenay-aux-Roses, le 26 mai 2026

Avis d'expertise nº 2026-00053 du 26 mai 2026

Objet : PNGMDR 2022 - 2026 : Evaluation de la faisabilité d'un stockage à faible profondeur de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) sur le site de la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines

Références : **[1]** Lettre ASNR CODEP-DRC-2025-021389 du 2 avril 2025
[2] Dossier d'options techniques et de sûreté de mars 2024
[3] Arrêté du 9 décembre 2022 pris en application du décret nº2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement
[4] Lettre ASN CODEP-DRC-2016-013550 du 19 juillet 2016

Au 1er janvier 2025, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sont devenus l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR). Dans la suite de cet avis, les acronymes ASN et IRSN sont maintenus lorsqu'il est fait référence à des documents ou positions émis par ces organismes avant leur fusion.

Par lettre citée en première référence, la Direction des déchets, des installations de recherche et du cycle (DRC) de l'ASNR a demandé l'avis de la Direction de la recherche et de l'expertise en environnement (PSE-ENV) de l'ASNR sur le Dossier d'options techniques et de sûreté (DOTS) relatif à la faisabilité d'un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL dans la formation argileuse du site de la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines CCVS [2], transmis par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) dans le cadre du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) 2022-2026 et en application de l'article 33 de l'arrêté du 9 décembre 2022 [3]. Ce dernier dispose qu'un dossier présentant les options techniques et de sûreté retenues soit déposé puis suivi, cinq ans après l'avis de l'ASNR sur ce dossier, de la remise d'un dossier d'options de sûreté (DOS).

Le DOTS vise à présenter les options techniques et de sûreté d'un stockage à 30 m de profondeur au sein de la formation argileuse du site de la CCVS pour les déchets de type radifères, graphites, enrobés bitumés, déchets technologiques et de procédés, relevant de la catégorie FA-VL[1]. L'évaluation de sûreté après fermeture menée par l'Andra, sur lesquelles le DOTS se focalise, la conduit toutefois, sur la base d'un critère de protection radiologique, à n'envisager qu'un stockage de déchets radifères pour la suite des études relatives au site de la CCVS, avec potentiellement « *une quantité très limitée* » des trois autres typologies de déchets pour laquelle l'Andra ne définit pas à ce jour d'inventaire associé. Le présent avis concerne donc le stockage sur le site de la CCVS des déchets radifères uniquement. PSE-ENV rappelle que les modalités de gestion des autres typologies de déchets précitées font l'objet de travaux complémentaires dans le cadre du PNGMDR visant à définir les scénarios et mettre à jour la stratégie de gestion des déchets FA-VL (cf. Actions FAVL.2 et FAVL.3 du PNGMDR 2022-2026).

[1] Les résidus uranifères de traitement de conversion de l'uranium (RTCU), relevant également de la catégorie FA-VL, ne sont pas intégrés par l'Andra à l'étude relative au site de la CCVS car un projet d'installation de stockage dédiée est actuellement à l'étude par Orano sur ou à proximité du site de Malvési (cf. Action FAVL.5 du PNGMDR 2022-2026).

Adresse du siège social : 15 rue Louis Lejeune - 92120 Montrouge
Adresse postale : BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses cedex
Tél. : +33 (0)1 58 35 88 88 - Courriel : asnr-courrier@asnr.fr

DRC a demandé que soient examinées en particulier (i) les connaissances de base relatives aux caractéristiques du site de la CCVS et à son évolution future retenues pour l'évaluation de sûreté du stockage, (ii) la conception du stockage intégrant notamment les techniques constructives et le mode de conditionnement des déchets radifères au regard de la démonstration de sûreté, (iii) l'évaluation de sûreté après fermeture du stockage et enfin (iv) les études à réaliser dans la perspective de l'établissement du DOS[2].

De l'évaluation du dossier transmis et des informations fournies par l'Andra au cours de l'expertise, PSE-ENV retient les principaux éléments développés ci-après.

1. CARACTERISTIQUES DU SITE DE LA CCVS

La connaissance du sous-sol d'un site envisagé pour l'implantation d'un stockage de déchets radioactifs FA-VL doit permettre de vérifier que celui-ci dispose de propriétés appropriées pour contribuer de manière suffisante aux deux fonctions de sûreté après fermeture du stockage, à savoir (i) isoler les déchets de la biosphère, eu égard aux phénomènes d'érosion et aux activités humaines banales et (ii) limiter le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques contenus dans les colis de déchets. Cette connaissance repose sur la caractérisation du site, dont le niveau de détail croit avec l'avancement du projet dans le but d'affiner, à chaque étape (cf. norme SSR-5 de l'AIEA), l'évaluation de sa sûreté, ainsi que sur la modélisation de son évolution future.

L'Andra a engagé en 2013 des investigations géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques au sein de la CCVS, qui l'ont notamment conduite, dans un rapport d'étape transmis en 2015 relatif au projet de stockage de déchets FA-VL, à retenir la couche des Argiles tégulines comme formation hôte pour ce stockage. Celle-ci affleure sur une grande partie de la CCVS et s'épaissit jusqu'à 80 m vers le nord. La formation des Argiles tégulines, sous-divisée en trois unités lithologiques selon les proportions d'argile, de quartz et de silicates, est sus-jacente à l'aquifère des Sables verts (cf. Figure 1 en Annexe 2 au présent avis). Une deuxième campagne d'investigations, conduite en support au DOTS de 2016 à 2019, s'est focalisée sur les propriétés des Argiles tégulines, ainsi que sur la compréhension des processus d'évolution géomorphologique d'une zone dite restreinte de 10 km² (cf. Figure 2 en Annexe 2 au présent avis). Il est à noter que l'Andra exclut dorénavant au sein de cette zone, afin de minimiser les transferts à long terme de substances vers les exutoires, les secteurs où ces argiles présentent une épaisseur inférieure à 60 m et un gradient hydraulique vertical ascendant. Enfin, l'Andra prévoit une nouvelle campagne de caractérisation du site pour affiner l'ensemble des connaissances acquises à ce jour, notamment dans la zone restreinte précitée. Le programme de cette nouvelle campagne a fait l'objet d'une feuille de route (transmise par l'Andra au cours de l'expertise) décrivant les grandes orientations des études envisagées en vue d'établir le DOS d'un stockage de déchets FA-VL sur ce site.

L'état actuel des connaissances issues de la caractérisation du site de la CCVS concerne principalement le schéma structural de ce site et les paramètres géomécaniques et hydrogéochimiques des Argiles tégulines, examinés ci-après. PSE-ENV présente ensuite son analyse des éléments que retient l'Andra relatifs à l'évolution géodynamique prospective du site et enfin à la zone d'implantation possible du stockage.

S'agissant du schéma structural, l'Andra indique que les mesures géophysiques récentes n'ont pas mis en évidence de discontinuité sur la zone restreinte. Elle prévoit, lors de la prochaine campagne de caractérisation du site, des études supplémentaires visant à confirmer l'absence de failles sur l'ensemble de la zone. PSE-ENV estime, s'agissant des zones déjà investiguées par méthode géophysique, que la position et l'orientation des profils sismiques de la campagne 2016-2019 ne permettent pas à ce stade d'écarter définitivement la présence d'une discontinuité mineure suspectée lors de l'expertise du rapport d'étape de 2015 dans la partie nord de la zone restreinte. Par conséquent, **il conviendra que l'Andra porte une attention particulière sur cette partie nord dans le cadre des investigations à venir afin de statuer définitivement sur la présence ou l'absence d'une telle discontinuité.**

[2] L'Andra a indiqué au cours de l'expertise que dans la mesure où l'inventaire des déchets serait limité à des déchets radifères, et en considérant une exclusion des familles de déchets radifères jugées non compatibles avec le projet de stockage (cf. chapitre 4 du présent avis), la valeur du coefficient Q (évalué en application des articles L. 593-2 et R. 593-2 du code de l'environnement) associé à l'installation de stockage serait inférieure au seuil de 10^9 à partir duquel une installation est classée INB. Selon elle, le stockage relèverait ainsi de la règlementation ICPE et les études à mener en cas de poursuite du projet seraient alors conduites dans le cadre d'une procédure d'autorisation environnementale, avec comme perspective une étude de niveau APS à transmettre en vue d'une Demande d'Autorisation d'Exploiter (DAE).

S'agissant de la caractérisation des Argiles tégulines, l'Andra a acquis lors de la deuxième campagne un ensemble de données au sein de la zone restreinte, notamment en termes de perméabilité, de propriétés de rétention et d'épaisseur, qui complète et consolide la connaissance de ces argiles afin d'évaluer leur capacité à retarder et limiter la migration des substances contenues dans les colis de déchets. En outre, en réponse à une demande de l'ASN suite à l'examen du rapport d'étape de 2015 [4], l'Andra a en particulier réalisé un grand nombre de mesures focalisées sur la première dizaine de mètres de profondeur pour mieux caractériser l'état d'altération des Argiles tégulines due aux phénomènes de surface. Compte tenu des données réunies par l'Andra et d'une manière générale, **PSE-ENV convient que les connaissances acquises lors des deux premières campagnes d'investigations attestent, au stade actuel du projet, de propriétés de confinement *a priori* favorables des Argiles tégulines pour accueillir un stockage de déchets radifères**. PSE-ENV relève qu'un certain nombre d'éléments reste à acquérir dans la perspective d'établir un DOS, ainsi que le prévoit l'Andra d'après sa feuille de route. Cette future campagne inclut notamment :

- des reconnaissances géotechniques au-delà de la profondeur de 20 m à laquelle elles se sont limitées à date, notamment pour améliorer les connaissances sur le fluage de l'argile. Ces éléments visent à affiner l'estimation de l'endommagement de l'argile induit par la présence du stockage et permettront à l'Andra d'orienter le choix du concept de stockage à retenir (cf. chapitre 3 du présent avis) ;
- des mesures de perméabilité *in situ,* les connaissances actuelles se limitant à des mesures sur échantillons qui tendent à sous-estimer la perméabilité à l'échelle du système de stockage. Les résultats de telles mesures contribueront à une meilleure appréhension de la variabilité de ce paramètre, notamment du fait de la présence éventuelle de zones sableuses ou fracturées, comme demandé par l'ASN suite à l'examen du rapport d'étape de 2015 [4] ;
- des mesures de charge hydraulique au sein des Argiles tégulines et dans les Sables verts, pour l'élaboration d'un modèle hydrogéologique visant à affiner l'évaluation du gradient hydraulique vertical au sein des argiles ;
- des estimations de coefficient de partage, « Kd »[3], sur les Argiles tégulines saines pour davantage d'éléments chimiques[4] et ce, sur la base de l'ensemble de la gamme de compositions des eaux porales de ces argiles. Enfin, des mesures de Kd sont également prévues sur des argiles remaniées (après excavation) afin de vérifier l'applicabilité des valeurs de Kd estimées sur les argiles saines à celles remaniées qui seraient utilisées pour constituer un composant du stockage.

PSE-ENV estime que les orientations du programme de la prochaine campagne de caractérisation sont de nature à permettre à l'Andra de disposer de connaissances supplémentaires relatives au site utiles pour consolider l'évaluation de sûreté de l'installation de stockage attendue au stade du DOS. Ces orientations **sont donc pertinentes**. PSE-ENV souligne toutefois, eu égard aux éléments précisés *supra*, qu'**il conviendra que l'Andra veille à la représentativité des valeurs des paramètres restant à déterminer sur toute la hauteur des Argiles tégulines, compte tenu notamment de leur structuration en trois unités lithologiques distinctes.**

S'agissant de l'évolution géodynamique prospective du site, il convient, d'après les orientations générales de sûreté en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de FA-VL établies par l'ASN en 2008 (dite "Note ASN de 2008" dans la suite du présent avis), que le choix du site d'implantation du stockage permette d'apprécier son évolution sur une période de temps suffisante au regard de la nocivité des déchets stockés. Cette Note ASN de 2008 distingue deux phases successives. La première représente la période durant laquelle l'évolution du milieu géologique est considérée comme stable, c'est à dire limitée et prévisible, afin de vérifier que la conception du stockage satisfait l'objectif fondamental de sûreté (protection des personnes et de l'environnement). La seconde vise quant à elle à représenter les incertitudes grandissantes sur cette évolution, du fait notamment de la survenue des prochaines périodes glaciaires, et ce, afin de vérifier que le relâchement des substances radioactives issues du stockage ne conduirait pas à des doses inacceptables. A cet égard, les travaux d'un groupe de travail (GT) dédié aux modifications à apporter à la Note ASN de 2008[5], ainsi que l'avis du Groupe

[3] Le Kd est le rapport, pour un élément chimique donné, de la quantité de cet élément sorbée sur la phase solide du milieu et de la quantité présente en solution.
[4] Les valeurs de Kd et de limite de solubilité prises en compte par l'Andra dans le DOTS sont issues de mesures sur des échantillons d'Argiles tégulines pour certaines espèces (cas du Th, du Ra, de l'U et de l'Ac pour les déchets radifères). Pour d'autres éléments comme le C organique, le K et le Pb, les valeurs de Kd ont été estimées par analogie avec le comportement de ces espèces dans d'autres roches argileuses, notamment les argilites du Callovo-Oxfordien étudiées dans le cadre du projet Cigéo.
[5] Les travaux de ce GT sont synthétisés dans le Rapport IRSN 2020-00962.

permanent d'experts pour les déchets (GPD) relatif à ces éventuelles modifications[6], ont mis en exergue le fait que la durée d'au moins 10 000 ans associée dans la Note ASN de 2008 à la première phase dite de stabilité (évolution limitée et prévisible) pourrait être remise en cause par les connaissances acquises sur le réchauffement climatique et son impact potentiel sur l'évolution géodynamique d'un site. Le GPD considère dès lors que la durée de stabilité à retenir dans la démonstration de sûreté doit être basée sur une analyse spécifique au site sélectionné.

De ce fait, l'Andra a étudié les évolutions possibles du climat et ses conséquences en termes d'érosion du site de la CCVS en considérant différents scénarios climatiques établis en 2003 dans le cadre du projet européen BIOCLIM[7]. A l'instar du rapport d'étape de 2015, elle retient un scénario (A4) correspondant à une évolution du climat sans perturbation anthropique et un scénario (B4) correspondant à une évolution du climat perturbée par les activités humaines, avec une poursuite de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre au même rythme qu'actuellement et sans mise en œuvre de politique climatique dédiée. L'Andra ne retient pas de scénario de climat froid et précise en outre que dans les deux scénarios retenus, l'occurrence de la prochaine période glaciaire ne surviendrait qu'au-delà des prochains 50 000 ans. Elle considère donc cette durée de 50 000 ans comme période d'évolution limitée et prévisible du milieu géologique dans les évaluations de sûreté après-fermeture (cf. chapitre 4 du présent avis).

Pour ce qui concerne l'aléa érosif du site de la CCVS retenu par l'Andra, son évaluation repose sur les connaissances relatives aux effets de l'érosion observés sur ce site (caractéristiques géologiques, géophysiques, pédologiques…), acquises lors des deux premières campagnes de terrain, ainsi que sur des estimations quantitatives développées postérieurement au rapport d'étape de 2015. Ces estimations incluent une modélisation de la perte de sol jusqu'à 50 000 ans, réalisée à l'aide du code RUSLE[8], ainsi qu'une étude testée de manière exploratoire à ce stade pour apprécier l'évolution du site jusqu'à 100 000 ans (approche dite LEM[9]) en tenant compte des phénomènes de dépôts de sol et de la dynamique des cours d'eau environnants. L'application des taux d'érosion évalués avec le code RUSLE pour les scénarios A4 et B4 conduit à une épaisseur érodée de 80 cm en moyenne à 50 000 ans sur la zone d'étude (8 m au maximum localement) pour le scénario A4 et à 4 m en moyenne pour le scénario B4. Pour ce dernier, une érosion maximale de 21 m est calculée au niveau du cirque de la Garenne, dont l'Andra prévoit par conséquent de s'écarter pour la suite du projet. La modélisation réalisée avec l'approche LEM tend pour sa part à montrer un aplanissement progressif de la topographie au cours des 100 000 ans considérés, lié à un état d'équilibre entre érosion et dépôt de sol et donc des taux d'érosion plus faibles que ceux précités. L'Andra considère que ces résultats permettent de confirmer qu'une érosion de 10 m à 50 000 ans, retenue comme au stade du DOS pour son évaluation de la sûreté de l'installation de stockage après sa fermeture, est une valeur enveloppe. Elle identifie, dans le DOTS, le besoin de poursuivre les études sur l'évolution future du site en vue d'affiner l'évaluation de l'évolution climatique à long terme et la quantification des phénomènes d'érosion.

S'agissant des taux d'érosion estimés par l'Andra pour les scénarios qu'elle retient, PSE-ENV considère, sur la base des résultats de ses propres calculs réalisés avec les hypothèses d'évolutions climatiques de l'Andra mais à l'aide du code DionisosFlow, qui prend en compte l'érosion hydrique et l'érosion gravitaire, que les résultats obtenus par l'Andra avec le code de calcul RUSLE constituent une estimation enveloppe de l'érosion des plateaux et des cours d'eau mais que cette érosion serait sous-estimée au niveau des pentes. PSE-ENV considère néanmoins que ce potentiel écueil ne met pas en cause le caractère enveloppe du taux d'érosion de 10 m à 50 000 ans pris en compte sur l'ensemble de la zone d'étude (hors cirque de la Garenne) en considérant des hypothèses d'évolution climatique fondées sur le projet BIOCLIM.

PSE-ENV observe par ailleurs, s'agissant des scénarios climatiques retenus par l'Andra, que le scénario B4 couvre bien, en termes d'émissions de gaz à effet de serre, le scénario le plus pessimiste défini par le GIEC en

[6] Groupe permanent d'experts pour les déchets - Avis relatif à l'élaboration d'un guide pour le stockage de déchets de faible activité à vie longue - 23 mars 2021. https://reglementation-controle.asnr.fr/content/download/185357/file_2/GPD-23-03-2021-Avis.pdf
[7] Bioclim, 2000-2003. Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal - European Commission 5th Euratom Framework Programme Contract FIKW-CT-2000-00024s. https://www.andra.fr/mini-sites/bioclim/documentation.htm
[8] Revised Universal Soil Loss Equation. Le code RUSLE, largement utilisé dans le monde, intègre des données relatives à la topographie, l'hydrologie, l'érosion mécanique, le climat et la nature des sols. Ce code permet une modélisation statique, à savoir qu'il ne prend pas en compte les évolutions de type dépôt de sol ou modification des cours d'eau au cours de la modélisation.
[9] Landscape Evolution Modeling (modélisation de l'évolution des paysages).

2023 (SSP5-8.5[10]). En revanche, pour les autres paramètres que la quantité de gaz à effet de serre, PSE-ENV rappelle, comme indiqué dans le cadre de l'expertise du Dossier de demande d'autorisation de création du projet Cigéo[11], la nécessité pour l'Andra de tenir compte de l'évolution des connaissances acquises depuis le projet BIOCLIM dans l'objectif de mettre à jour ses simulations de l'évolution perturbée du climat. En effet, l'augmentation des moyens de calculs depuis 2003 rend dorénavant possible la représentation de processus physiques tels que l'intensité du rayonnement solaire et les turbulences atmosphériques ainsi que leurs interactions, tout en permettant une discrétisation spatio-temporelle notablement affinée. PSE-ENV estime, en cohérence avec les travaux de Hourdin et Guillemot (2021)[12], qu'une telle modélisation pourrait conduire à des paramètres climatiques différents de ceux issus du projet BIOCLIM.

En outre, PSE-ENV relève que les connaissances relatives aux mouvements de l'orbite terrestre (cycles de Milankovitch) montrent que plusieurs périodes de refroidissement notable du climat sont attendues dans la dizaine de milliers d'années à venir[13]. Même si la communauté scientifique tend à exclure la possibilité qu'un de ces refroidissements bascule vers une glaciation avant au moins 50 000 ans du fait des perturbations anthropiques du climat, les conséquences associées à la survenue d'alternances de gel/dégel marquées, caractéristiques d'un climat froid, restent susceptibles d'affecter les terrains sur des profondeurs plus importantes au niveau de la zone d'étude que celles évaluées sur la base des seuls scénarios A4 et B4.

Ainsi, PSE-ENV s'interroge sur le caractère enveloppe du taux d'érosion de 10 m en 50 000 ans et souligne qu'une valeur significativement plus importante pourrait remettre en cause la durée à retenir pour la phase d'évolution limitée du milieu géologique. Par conséquent, **PSE-ENV considère que, dans le DOS, l'Andra devrait vérifier que la prise en compte de l'évolution des connaissances acquises depuis le projet BIOCLIM ainsi qu'une entrée en climat froid avec une répétition de cycles de gel/dégel ne remettent pas en cause la valeur enveloppe du taux d'érosion retenue dans le DOTS.**

S'agissant enfin de la zone d'implantation possible du stockage, compte tenu des critères de site établis par l'Andra sur la zone étudiée en lien avec les enjeux de sûreté à long terme évoqués *supra* (épaisseur minimale de 60 m d'Argiles tégulines, gradient hydraulique vertical descendant, exclusion du cirque de la Garenne à fort potentiel érosif), PSE-ENV constate qu'au stade actuel des connaissances de l'Andra, et sous réserve de la confirmation des taux d'érosion (cf. *supra*), il resterait une zone répondant à ces critères d'environ 50 ha au nord de la route RD400 et une zone d'environ 80 ha au sud de cette route. A ce stade de développement du projet, la superficie nécessaire au stockage des déchets radifères, qui varie selon les configurations étudiées (cf. chapitre 3 ci-après), s'élève au maximum à environ 35 ha. Aussi, **PSE-ENV observe que les superficies ainsi disponibles apparaissent suffisantes, à ce stade du projet, au regard de celles nécessaires au stockage des déchets radifères**.

2. INVENTAIRE ET CONDITIONNEMENT DES DECHETS RADIFERES

Les déchets radifères pris en compte par l'Andra dans le DOTS, dont les caractéristiques principales sont résumées en Annexe 3 au présent avis, sont de nature variée (poudres, boues, terres, gravats, sources…) et répartis en 18 familles. La plupart contient essentiellement des radioéléments d'origine naturelle issus de la chaîne du thorium 232[14] et/ou de la chaîne de l'uranium 238[15]. Dans son dossier, l'Andra a associé aux déchets de la catégorie radifère une faible quantité de déchets contenant des radionucléides artificiels, tels que les déchets d'assainissement contaminés au carbone 14 et les sources scellées contenant de l'américium 241 provenant de têtes de paratonnerres démontées.

Des activités industrielles menées par Solvay (anciennement Rhodia), le CEA et Framatome sont à l'origine de la majorité (environ 90 %) du volume conditionné total (75 000 m^3) des déchets radifères et de leur activité

[10] https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/
[11] Rapport d'expertise IRSN n°2024-00212 sur la Demande d'autorisation de création du projet Cigéo « GP1 » - Evaluation des données de base retenues pour l'évaluation de sûreté
[12] Modélisation du climat - Encyclopædia Universalis - F. Hourdin et H. Guillemot, 2021. https://web.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PEDAGO/HourdinGuillemotUniversalis.pdf
[13] *e.g.,* S. Barker et al., Science 387, eadp3491 (2025). DOI: 10.1126/science.adp349
[14] ^{232}Th, ^{228}Ra, ^{228}Ac, ^{228}Th, ^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{212}Po+^{208}Tl, ^{208}Pb (stable (*i.e.,* non radioactif)).
[15] ^{238}U, ^{234}Th, ^{234m}Pa, ^{234}U, ^{239}Th, ^{226}Ra, ^{222}Rn, ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po, ^{210}Pb, ^{210}Bi, ^{210}Po, ^{206}Pb (stable).

radiologique cumulée (estimée à quelques 10^{13} Bq à l'horizon 2050). L'Andra indique que ces déchets sont ou seront conditionnés, en vrac et sans immobilisation dans, selon les familles auxquelles ils se rattachent, des conteneurs béton (5,5 m^3 ou 6,4 m^3), des coques en béton de 500 L, des bennes ou caissons de 6 m^3, voire des bennes de 16,5 m^3 en cas d'architecture de stockage à ciel ouvert (cf. chapitre 3). Le reste des déchets radifères concerne les déchets contenant des substances radioactives d'origine naturelle (SRON), les déchets issus de l'assainissement d'anciens sites pollués et les déchets divers issus de petits producteurs ou du nucléaire diffus. Ces déchets sont ou seront conditionnés en caissons de 5 à 10 m^3 ou conteneur de 870 L.

Pour évaluer la sûreté après-fermeture du projet de stockage, l'Andra s'est basée sur les valeurs moyennes d'activité massique des radionucléides et de concentration en espèces chimiques de chaque famille de déchets fournies par les producteurs. A ce stade, cet inventaire ne prend pas en compte de marge pour tenir compte des incertitudes relatives à la caractérisation des déchets et à la quantité des déchets actuellement entreposés sous forme de dépôt à Itteville, ou aux déchets non encore produits, ni de contribution éventuelle du conditionnement aux teneurs en substances toxiques chimiques. L'Andra a indiqué au cours de l'expertise qu'elle prévoyait de consolider l'inventaire retenu au travers d'échanges avec les producteurs notamment sur la méthodologie qu'ils ont retenue pour l'établissement de l'inventaire radiologique et chimique des déchets catégorisés FA-VL (*e.g., co*ncentration et spéciation des radionucléides et substances chimiques). **Aussi, il conviendra que l'inventaire retenu dans le DOS précise les incertitudes associées aux données présentées (masse, volume, activité, concentration) ainsi que les formes chimiques des contaminants présents dans les déchets**. En outre, la contribution des matériaux constitutifs des conditionnements pourrait être considérée pour élaborer cet inventaire, notamment en toxiques chimiques. Eu égard au conditionnement, PSE-ENV souligne que celui-ci pourrait contribuer à la sûreté en exploitation et après la fermeture du stockage et constate qu'à ce stade l'Andra ne précise pas les exigences à attribuer aux colis le cas échéant pour assurer, par exemple, la maîtrise des risques en cas de chute de colis ou la stabilité géomécanique du système de stockage (cf. point relatif aux vides résiduels au chapitre 4 ci-après). Dès lors, **il serait opportun que l'Andra définisse des exigences prévisibles d'acceptation des colis dès le stade du DOS, en cohérence avec la démonstration de sûreté afin, le cas échéant, d'anticiper les besoins de conditionnement ou de reconditionnement de certains déchets en vue de leur stockage**.

Par ailleurs, en plus des quantités de substances toxiques chimiques, l'Andra indique, pour chaque famille de déchets, les quantités de substances chimiques complexantes (chlorure, fluorure, nitrate, sulfate, carbonate, phosphate, TBP) et agressives (aluminium, magnésium, zinc, lithium, ammonium) contenues dans les déchets. Parmi ces deux types de substances, les nitrates, sulfates et ammonium présentent un enjeu particulier compte tenu de leur incidence sur l'évaluation de sûreté après-fermeture en termes d'accélération du transfert des radionucléides vers la nappe des Sables verts et de marquage chimique de cette nappe (cf. chapitre 4). Les trois familles de déchets de Solvay, représentant 40 % du volume total conditionné des déchets radifères (soit près de 30 000 m^3), contiennent la majorité des sels de nitrates, sulfates et ammonium recensés dans l'inventaire (de l'ordre de 80 % en masse). De ses évaluations de sûreté après fermeture, l'Andra conclut que la prise en compte de ces déchets dans l'installation de stockage nécessite un traitement préalable d'élimination de ces sels. Au cours de l'expertise, l'Andra a transmis la version préliminaire d'une feuille de route du programme envisagé par Solvay de réduction de la concentration en nitrates contenus dans les déchets « RRA »[16]. Dans cette feuille de route, Solvay indique que les résultats des essais de traitement effectués dans les années 2010 montrent une réduction de 80 à 90 % des nitrates des déchets étudiés. Afin d'envisager la construction et la mise en exploitation d'une installation industrielle de réduction des nitrates à horizon 2035, Solvay prévoit des essais en laboratoire en 2026-2029 puis des essais pilote en 2030-2033. PSE-ENV estime que les résultats acquis par Solvay sont encourageants quant à la faisabilité d'un tel traitement. PSE-ENV constate toutefois qu'aucun essai n'est mentionné concernant la réduction des concentrations en ammonium et en sulfate. A cet égard, l'Andra a indiqué, au cours de l'expertise, que les concentrations en ces substances devraient pouvoir être diminuées au même titre que celles des nitrates. En tout état de cause, PSE-ENV relève que la faisabilité du stockage d'environ 40 % des déchets radifères sur le site de la CCVS est conditionnée à une diminution significative préalable des concentrations en sels de nitrate, sulfate et ammonium. En cas d'impossibilité d'un tel traitement, l'inventaire éligible au stockage serait ainsi notablement réduit, ce qui interrogerait alors sur la pertinence de créer une

[16] Les déchets RRA, pour « résidus radifères », correspondent à la famille élémentaire RHO-4000 (cf. Annexe 3)

installation dédiée à cet inventaire. Aussi, **PSE-ENV considère que, dans le DOS, l'Andra devrait présenter des éléments conclusifs quant à la faisabilité d'un traitement pour réduire les concentrations en sels de manière significative lorsqu'ils sont contenus en proportion importante dans les déchets radifères**.

3. CONCEPTION DU STOCKAGE

Les études préliminaires de conception réalisées par l'Andra reposent, comme dans le rapport d'étape de 2015, sur deux grands types d'architecture de stockage, l'un dit "stockage à ciel ouvert" (SCO) et l'autre dit "stockage en souterrain" (SSO), ainsi qu'illustré sur la Figure 3 en Annexe 2 au présent avis. Il est à noter que l'Andra retient dorénavant l'implantation du stockage à une profondeur de 30 m afin de répondre à la demande de l'ASN de retenir des marges par rapport à la profondeur de 20 m prise en compte dans le rapport d'étape de 2015.

L'Andra présente dans son dossier une analyse comparative de différentes techniques de réalisation d'une installation de stockage (solutions par terrassement, soutènement ou une combinaison des deux techniques) dans le cas d'une architecture à ciel ouvert ainsi que pour différentes configurations d'installation souterraine, au regard de plusieurs considérations telles que la complexité de la mise en œuvre de ces techniques constructives, leur impact sur les enjeux de sûreté à long terme (*i.e.,* perturbations de la roche hôte liées à la construction et aux vides résiduels après la fermeture du stockage), sur les risques en exploitation (*e.g.*, manutention, inondation), sur la faisabilité de fermeture du stockage, ainsi que sur l'emprise et la capacité de stockage. PSE-ENV observe que cette analyse comparative, satisfaisante sur le plan des principes à ce stade du projet, ne conduit à exclure aucune des dispositions constructives considérées.

De ces études préliminaires de conception, l'Andra retient pour l'évaluation de sûreté après-fermeture, au stade du présent dossier, les trois configurations suivantes :

- un SCO constitué d'un terrassement depuis la surface avec talutage en niveau supérieur et soutènement vertical en niveau inférieur, dans lequel les déchets sont gerbés sur une hauteur de 6 m au-dessus d'un radier en béton armé d'une épaisseur de 80 cm. Pour les déchets radifères, la plateforme en fond d'excavation, contenant deux lignes d'ouvrage, mesurerait 850 m par 55 m, soit 4,7 ha ;
- un SSO avec alvéoles de stockage de 3 m de diamètre excavé (SSO 3 m) présentant une épaisseur de matériaux cimentaires (soutènement et revêtement) de 20 cm et dans lesquels les colis sont disposés sur un niveau. La plateforme de déchets radifères comprendrait 29 alvéoles réparties sur une surface de 880 m (longueur des alvéoles) par 400 m, soit 35,2 ha ;
- un SSO avec alvéoles de stockage de 6 m de diamètre excavé (SSO 6 m) présentant une épaisseur de matériaux cimentaires de 40 cm et dans lesquels les colis sont gerbés sur au moins deux niveaux. La plateforme de déchets radifères comprendrait 16 alvéoles réparties sur une surface de 480 m (longueur des alvéoles) par 400 m, soit 19,2 ha.

Les éléments présentés par l'Andra relatifs aux deux types d'architecture envisagés appellent les remarques suivantes.

S'agissant de l'architecture de stockage à ciel ouvert, PSE-ENV constate que les ordres de grandeur des pentes envisagées (2,5 horizontal pour 1 vertical) pour le talutage sont cohérents avec les pratiques usuelles de génie civil et estime que la stabilité des talus ne devrait pas être remise en cause par l'utilisation d'engins de chantier lourds. En outre, la mise en œuvre de techniques de soutènement dans des argiles depuis la surface apparait techniquement réalisable au regard de l'état de l'art. PSE-ENV considère que les valeurs de pentes retenues et les techniques de soutènement devront être confirmées au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances sur la nature du terrain et du développement du projet de stockage (choix de matériaux notamment). En particulier, PSE-ENV note que l'Andra envisage de déconstruire les ouvrages de soutènement au moment de la fermeture du stockage, au moins sur une partie de leur hauteur, afin que la couverture remaniée soit en contact direct avec la formation hôte et ainsi éviter que leur dégradation à long terme entraîne la formation de chemins d'écoulement préférentiels. L'Andra précise que cette déconstruction représente un enjeu à l'égard de la stabilité des terres compte tenu du rôle de ces soutènements dans la stabilité des terrains avoisinants. L'Andra a cependant précisé au cours de l'expertise, sur la base d'une simulation numérique, que la prise en compte de propriétés pénalisantes suite à la dégradation de la paroi en cas de maintien du soutènement n'aurait pas d'influence sur le transfert vers

la nappe sous-jacente qui constitue l'exutoire le plus important du stockage (cf. chapitre 4 ci-après relatif à la sûreté après fermeture du stockage) du fait du gradient hydraulique descendant, ce dont PSE-ENV convient.

Enfin, PSE-ENV constate qu'à ce stade, les performances attendues de la couverture remaniée, par exemple en termes de perméabilité, ne sont pas définies, alors qu'une demande de l'ASN suite au rapport d'étape de 2015[17] portait spécifiquement sur ce point. Or, les performances attribuées à la couverture remaniée, qui contribue à la sûreté de l'ensemble du stockage, pourraient affecter le choix des dispositions constructives à retenir pour sa mise en place (par exemple modalités de compactage des couches successives d'argile selon les exigences de perméabilité). Ainsi, au stade actuel de développement du projet et sans spécification par l'Andra des performances visées pour la couverture remaniée, PSE-ENV ne peut se prononcer sur la pertinence des dispositions constructives envisagées par l'Andra dans le cas du SCO, bien que le retour d'expérience documenté par l'Andra atteste de leurs bonnes capacités de limitation des écoulements. **Ce point est repris *infra*.**

S'agissant de l'architecture de stockage en souterrain, l'Andra cherche à préserver les propriétés de confinement favorables de la formation hôte en limitant le plus possible les perturbations géomécaniques liées à l'implantation du stockage. La préservation de ces propriétés favorables implique notamment de limiter les taux de vide laissés dans les ouvrages après leur fermeture afin de limiter les phénomènes de tassement différés susceptibles d'endommager l'argile de couverture. En l'absence de données géomécaniques précises à la profondeur du stockage (cf. chapitre 1 ci-avant), l'Andra évalue l'impact de ces déformations sur l'argile à l'aide de modélisations simples qui montrent qu'à ce stade, le taux de vide attendu dans les alvéoles fermés des deux configurations étudiées (SSO 6 m et SSO 3 m) pourrait conduire à une dégradation (à long terme) des propriétés de confinement de toute la couche d'argile située au-dessus des alvéoles. Au cours de l'expertise, l'Andra a indiqué que des études seraient menées en vue du DOS afin d'une part d'identifier des solutions de réduction des vides résiduels (telles que la mise en place de structures de génie civil adaptées à la géométrie des colis ou l'injection d'un matériau de remplissage), d'autre part d'affiner le modèle d'évaluation des déformations de la garde supérieure du stockage (notamment sur la base d'une acquisition de connaissances géomécaniques à la profondeur du stockage). A cet égard, PSE-ENV souligne qu'il conviendra que ces évaluations prennent également en compte l'existence de vides à l'intérieur des colis et la compressibilité propre à chaque type de déchets. L'Andra a également précisé que, comme indiqué ci-dessus, du fait d'un gradient hydraulique descendant, les transferts de solutés s'opèrent majoritairement dans la garde inférieure du stockage et seraient par conséquent peu impactés par une modification des performances de la garde supérieure, ce dont PSE-ENV convient.

D'une manière générale et quelle que soit l'architecture de stockage, PSE-ENV considère que la pertinence en termes de sûreté des techniques constructives ne peut être appréciée plus avant en l'absence d'exigences relatives aux performances des composants, définies en cohérence avec la démonstration de sûreté. A cet égard, PSE-ENV encourage l'Andra à compléter son analyse comparative pour différentes configurations lorsque ces exigences seront définies, en vue de justifier la solution de référence qui sera retenue pour le DOS, en articulation notamment avec l'évaluation d'impact après fermeture (cf. chapitre 4 ci-après).

Ainsi, **PSE-ENV considère que, dans le DOS, l'Andra devrait définir les exigences associées aux performances des composants du stockage, notamment celles associées à la garde supérieure du stockage (couverture en argile remaniée ou formation géologique en place). L'Andra devrait en outre justifier que ces exigences pourront être atteintes pour la configuration qui sera retenue en référence.**

4. EVALUATION DE SURETE APRES FERMETURE DU STOCKAGE

L'évaluation de la sûreté après fermeture d'une installation de stockage a pour objectif de s'assurer de sa sûreté passive sur le long terme, c'est à dire sans qu'il soit nécessaire d'intervenir, afin de protéger les personnes et l'environnement envers les risques liés à la dissémination des substances radioactives et toxiques chimiques. Cette évaluation doit en outre montrer la robustesse du stockage en regard des incertitudes relatives en particulier à l'évolution à long terme du milieu géologique. Pour ce faire, comme indiqué au chapitre 1 ci-avant, l'Andra évalue l'impact du projet de stockage de déchets FA-VL sur le site de la CCVS sur deux périodes distinctes. La première période, dite d'évolution limitée et prévisible du milieu géologique et dont la durée est estimée par l'Andra à

[17] L'ASN demandait à l'Andra de montrer que les objectifs préliminaires de performance pouvaient être atteints sans difficulté majeure.

50 000 ans, fait l'objet d'une évaluation sur la base (i) d'un scénario représentatif de l'évolution attendue du stockage (scénario d'évolution normale – SEN) et (ii) de scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI). S'agissant des scénarios d'évolution altérée (SEA), représentatifs d'évènements ou processus conduisant au dysfonctionnement des composants contribuant aux fonctions de sûreté, l'Andra prévoit leur étude dans le cadre du DOS, car elle ne considère pas ces scénarios comme dimensionnants pour les travaux en cours. Pour la seconde période, représentative d'incertitudes grandissantes sur l'évolution géodynamique du site, l'Andra se base sur des scénarios conventionnels avec une perte subite des performances de la couverture concourant aux fonctions de sûreté assignées au stockage. L'évaluation de sûreté de l'Andra porte, pour les déchets radifères, sur les substances qu'elle identifie comme d'intérêt, à savoir (i) pour les radionucléides sur ces deux périodes : les actinides et le radium 226 légèrement plus mobile que les actinides, (ii) pour les substances toxiques chimiques, sur la première période uniquement) : le bore, le sélénium et l'antimoine, qui sont moins retenus par sorption que les autres éléments dans les milieux argileux et cimentaires, ainsi que l'uranium du fait de sa présence en quantité significative dans le stockage.

PSE-ENV estime que la démarche générale de l'Andra basée sur deux périodes distinctes pour évaluer la sûreté après fermeture du projet de stockage sur le site de la CCVS est conforme dans son principe aux normes et guides en vigueur dont la Note ASN de 2008 précitée. Le choix par l'Andra des radionucléides et toxiques chimiques retenus pour les évaluations, ainsi que la limitation de l'évaluation de l'impact associé aux toxiques chimiques à la première période, n'appellent pas de remarque particulière à ce stade de développement du projet. Enfin, PSE-ENV considère que le report au DOS du traitement des SEA est concevable au stade actuel du projet dans la mesure où le traitement du SEN complété par des SIHI et la prise en compte d'une très forte dégradation de la couverture dans la seconde période d'évolution géodynamique permettent d'évaluer le comportement du système de stockage vis-à-vis de défaillances majeures de ses gardes supérieures et inférieures et ainsi d'apprécier le rôle des principaux éléments de conception.

L'évaluation d'impact présentée par l'Andra, fondée sur cette démarche, est examinée ci-après pour la première période d'évolution géodynamique (chapitre 4.1) puis pour la seconde période (chapitre 4.2). L'évaluation des concentrations en radon dans une habitation au droit du stockage, qui concerne ces deux périodes, est expertisée séparément (chapitre 4.3).

4.1. EVALUATIONS D'IMPACT ASSOCIEES A LA PREMIERE PERIODE D'EVOLUTION GEODYNAMIQUE

Scénario d'évolution normale (SEN)

Dans le cadre du SEN, l'Andra évalue l'impact sanitaire induit par la migration des substances radioactives et toxiques chimiques d'intérêt relâchées depuis le stockage, dans chacune des trois configurations de stockage envisagées (cf. chapitre 3). Deux exutoires situés au droit du stockage, atteints après diffusion ascendante des substances radioactives et chimiques à travers les argiles de couverture, sont considérés : le sol et une rivière. L'Andra retient également un exutoire consistant en un puits d'extraction d'eau dans la nappe sous-jacente des Sables verts à l'aval immédiat du stockage, qui alimente les usages domestiques et agricoles, atteint après diffusion et convection descendantes des substances issues du stockage. Pour estimer l'impact sanitaire, elle retient une biosphère « tempérée », représentative du climat actuel sur le site, et une biosphère « chaude », en lien avec un réchauffement prospectif du climat sur la période considérée. PSE-ENV considère que le choix par l'Andra des exutoires, usuel pour ce type de stockage, ainsi que la définition des biosphères pour évaluer l'impact radiologique et des substances toxiques chimiques post-fermeture, sont globalement pertinents à ce stade des études. En effet, même si la prise en compte d'une biosphère froide aurait permis de compléter l'évaluation, notamment au regard des considérations sur les scénarios climatiques mentionnées au chapitre 1 ci-avant, PSE-ENV convient, sur la base de son expertise de la DAC de Cigéo et des connaissances actuelles, qu'une biosphère froide devrait conduire à des impacts plus faibles que les autres types de biosphère du fait d'une exploitation plus limitée des ressources[18].

Le SEN se compose d'une situation « de référence », fondée sur les valeurs moyennes des paramètres d'écoulement et de transport relatifs au site de la CCVS et au stockage, et d'une situation « enveloppe », qui

[18] A titre d'exemple, pour une biosphère de type boréale, il est attendu une période végétative écourtée, un gel saisonnier qui affecte les cultures et des besoins en irrigation moindres.

cumule des données conservatives et des hypothèses pénalisantes vis-à-vis des transferts. Dans ces deux situations, l'Andra retient, pour représenter l'évolution géodynamique du site, une érosion de 5 m s'opérant sur les premiers 10 000 ans, suivie d'une érosion de 5 m supplémentaires s'opérant sur les 40 000 ans suivants, de sorte à couvrir les taux d'érosion estimés à 50 000 ans sur la base des études géoprospectives du site (cf. chapitre 1 ci-avant). La démarche de définition du SEN, identique à celle appliquée aux autres stockages existants ou en projet de l'Andra, n'appelle pas de remarque. Dans sa déclinaison, PSE-ENV estime, d'une manière générale et à l'exception de la réserve sur la valeur du taux d'érosion enveloppe (et la durée de stabilité géologique qui en découle) exprimée au chapitre 1, que les valeurs de paramètres considérées dans les deux situations du SEN apparaissent cohérentes avec des données acquises au stade actuel des connaissances, qu'il s'agisse de celles relatives aux caractéristiques du site, aux déchets ou aux autres composants constitutifs du stockage. A cet égard, PSE-ENV portera une attention particulière à la confirmation, dans le DOS, du caractère enveloppe de la situation dite « enveloppe » du SEN sur la base des résultats de l'ensemble des études planifiées pour l'établissement de ce dossier.

Les résultats des évaluations réalisées par l'Andra pour les deux situations du SEN montrent que le stockage des déchets de graphite, de déchets bitumés, ou de déchets technologiques engendrerait un impact inacceptable pour chacune de ces catégories prise individuellement. Dès lors, PSE-ENV convient du bien-fondé de ne plus considérer un stockage global de l'ensemble de ces déchets pour la suite du projet relatif au site de la CCVS. S'agissant des déchets radifères, les résultats indiquent que les impacts maximaux associés aux deux exutoires de surface sont négligeables en comparaison de ceux associés à une utilisation de l'eau de la nappe des Sables verts, compte tenu de l'implantation du stockage en zone de gradient hydraulique descendant. En outre, la contrainte de dose de 0,25 mSv/an préconisée dans la Note ASN de 2008 est respectée dans les deux situations du SEN pour les configurations SCO et SSO 6 m retenues par l'Andra (cf. Tableau 1 en Annexe 2 au présent avis). Pour la configuration SSO 3 m, l'impact maximal, de 10^{-5} mSv/an pour la situation « de référence », atteint 1,15 mSv/an dans le cas de la situation « enveloppe ». Ce résultat plus défavorable obtenu avec la configuration SSO 3 m, sans toutefois être rédhibitoire notamment à ce stade des études selon PSE-ENV, est lié au fait que cette configuration met en jeu une moindre quantité de matériaux cimentaires, qui favorisent la sorption des substances issues des déchets radifères, que les deux autres configurations (cf. chapitre 3). Pour rappel, l'écart important (cinq à huit ordres de grandeur) entre les résultats issus des deux situations du SEN pour chacune des trois configurations de stockage s'explique par le cumul d'hypothèses pénalisantes et de valeurs de paramètres enveloppes qui définissent la situation « enveloppe » du SEN. Par ailleurs, une étude de sensibilité menée par l'Andra montre qu'une élimination des sels contenus dans les déchets radifères (cf. chapitre 2 ci-avant) conduirait à diminuer ces impacts radiologiques d'un à quatre ordres de grandeur (en dehors de la configuration SSO 3 m où la diminution est faible) et à éliminer le marquage chimique estimé en présence des sels[19], notamment en nitrates et en ammonium, de la nappe sous-jacente. **Aussi, PSE-ENV considère que ces premiers résultats tendent à montrer à ce stade une bonne capacité globale de confinement du stockage vis-à-vis du transfert des actinides et du radium 226 en SEN, dès lors que les composants ouvragés à base de ciment contribuent efficacement à la sorption de ces radionucléides.**

S'agissant de l'impact associé aux substances toxiques chimiques, l'Andra retient comme objectif de protection, en cohérence avec la circulaire du 9 août 2013 relative à la démarche de prévention et de gestion des risques sanitaires des installations classées soumises à autorisation, un excès de risque individuel (ERI)[20] inférieur à 10^{-5} et un quotient de danger (QD)[21] inférieur à 1. Les évaluations de l'Andra, basées uniquement sur la situation « enveloppe » du SEN à ce stade, conduisent à des ERI acceptables mais à des QD supérieurs à 1 pour l'uranium en SSO (valeur maximale à 19) et pour le sélénium dans chacune des trois configurations (valeurs maximales comprises entre 3 et 4,5). L'Andra a précisé au cours de l'expertise que les impacts associés à l'uranium respecteraient l'objectif de protection en configuration SSO 6 m en cas d'élimination des sels et qu'une atténuation du transfert du sélénium vers la nappe serait obtenue en positionnant le stockage dans la partie nord de la zone restreinte, où l'épaisseur de la garde inférieure des Argiles tégulines est la plus importante[22]. S'agissant de l'impact

[19] Marquage chimique consistant en des concentrations en nitrates et en ammonium proches des limites de qualité des eaux brutes destinées à la consommation humaine.
[20] L'ERI est évalué pour les espèces cancérigènes sans seuil.
[21] Le QD est évalué pour les espèces non cancérigènes et cancérigènes à seuil.
[22] En configuration SSO 6 m, le QD maximal associé au sélénium ne serait plus que de 1,8 en considérant 10 m d'argiles supplémentaires sous le stockage.

sanitaire chimique lié à l'uranium, PSE-ENV constate que le respect des objectifs de protection ne peut être assuré en configuration SSO 3 m et qu'il est conditionné à l'élimination des sels en configuration SSO 6 m, ce qui renvoie à l'importance des études de faisabilité d'un tel traitement (cf. recommandation formulée au chapitre 2 du présent avis). En outre, PSE-ENV note que l'Andra dispose pour le sélénium d'une piste pour réduire son impact, *via* un positionnement du stockage dans la zone nord, à une valeur proche de l'objectif de protection (QD légèrement supérieur à 1). Aussi, PSE-ENV considère que l'impact sanitaire associé au sélénium, calculé uniquement sur la base de la situation enveloppe du SEN, n'apparait pas rédhibitoire au stade actuel du projet. Néanmoins, et d'une manière plus générale, **PSE-ENV estime nécessaire que l'Andra complète, dans le DOS, l'évaluation de l'impact sanitaire associé aux toxiques chimiques en la basant également sur la situation de référence du SEN afin de mieux apprécier le degré de conservatisme associé aux résultats, en particulier s'agissant du sélénium.**

Pour ce qui concerne les impacts environnementaux, non traités au stade du présent DOTS, l'Andra prévoit de les analyser dans le cadre de l'étude d'impact à produire dans le dossier lorsqu'il sera au stade d'Avant-Projet Détaillé. PSE-ENV rappelle que le PNGMDR prévoit ce niveau de maturité pour le DOS.

Scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI)

La profondeur de 30 m retenue dans le DOTS pour l'implantation du stockage, bien qu'elle constitue une avancée selon PSE-ENV par rapport à la profondeur de 20 m retenue au stade du rapport d'étape de 2015, ne permet pas de s'affranchir au cours du temps des risques d'intrusions humaines banales compte tenu de la réduction par l'érosion de cette profondeur (c'est-à-dire de l'épaisseur de la couverture). A la différence du SEN, l'Andra retient pour évaluer ces risques, comme dans le rapport d'étape de 2015, des érosions « instantanées » de 10 m à 10 000 ans et de 10 m supplémentaires à 50 000 ans afin de tenir compte de variations de l'aléa érosif potentiellement plus marquées localement, davantage susceptibles d'affecter les conséquences d'une situation d'intrusion que celles associées à l'évolution normale du stockage.

Dans l'objectif d'évaluer l'impact du stockage lié à une mobilisation des substances radioactives et chimiques en cas d'intrusion humaine banale, l'Andra considère, selon la date d'occurrence de l'intrusion et donc de l'épaisseur de couverture résiduelle après érosion, différents scénarios d'exposition (SIHI « voie air ») : un forage géotechnique ou un chantier routier traversant le stockage, une résidence construite sur les déblais issus du forage ou du chantier routier, associée à des jeux d'enfants sur ces déblais (cf. Figure 4 en Annexe 2 au présent avis). Le scénario de forage géotechnique est évalué dès 500 ans après la fermeture du stockage, en lien avec une perte présumée de sa mémoire, puis à chaque phase érosive, tandis que le chantier routier, d'une profondeur maximale d'une dizaine de mètres selon l'Andra, n'est considéré que lorsqu'il ne reste plus que 10 m de couverture au-dessus du stockage, soit à 50 000 ans. En complément, l'Andra évalue l'impact d'une intrusion à travers le stockage de type forage d'exploitation d'eau (SIHI « voie eau »). A l'instar du scénario de forage géotechnique, celui-ci est supposé survenir dès 500 ans après la fermeture du stockage. Ce forage « voie eau », considéré comme abandonné, provoque un court-circuit de la barrière géologique et constitue ainsi un chemin préférentiel pour la migration aqueuse des substances radioactives et chimiques vers la nappe des Sables verts, où il est mis en relais avec un forage d'exploitation d'eau à usage domestique.

PSE-ENV constate que les types de scénarios utilisés par l'Andra pour évaluer l'impact d'intrusions humaines banales (forage, chantier routier, résidence, jeux d'enfants) sont cohérents avec ceux mentionnés dans les normes et guides nationaux et internationaux relatifs à l'évaluation de la sûreté d'un stockage de déchets radioactifs[23] et relève que l'Andra tient bien compte de la réduction progressive de l'épaisseur de la couverture dans le temps du fait de l'érosion. A cet égard, PSE-ENV peut convenir que l'épaisseur initiale de couverture de 30 m retenue par l'Andra conduise à s'affranchir d'un scénario de résidence ou de chantier routier qui atteindrait les déchets stockés. Néanmoins, PSE-ENV observe que dans la conceptualisation par l'Andra du scénario de résidence, celle-ci est supposée construite sur des déblais excavés déposés en surface ; ce scénario n'est ainsi associé qu'à une partie très limitée des déchets jusqu'à 50 000 ans puisqu'il s'agit des déblais issus du forage[24]. Le chantier routier n'atteint quant à lui les déchets qu'après 50 000 ans (profondeur de couverture de 10 m). Or comme indiqué par

[23] Voir par exemple les documents SSR-5 et SSG-23 de l'AIEA, ainsi que la Note ASN de 2008.
[24] Au maximum 6 m de hauteur de déchets et autres matériaux du stockage interceptés par un forage d'un diamètre de 150 mm.

le GPD dans son avis mentionné *supra*[6], en cohérence avec les pratiques recommandées à l'international[25], une profondeur de l'ordre de 30 m devrait être retenue pour représenter de manière conventionnelle les intrusions humaines « banales », quelle que soit l'échéance à laquelle elles sont considérées. Une quantité de déchets significativement plus importante pourrait donc être prise en compte dans ces types de scénario, par exemple en considérant les déchets excavés pour une construction de plus grande ampleur de type immeuble (construction profonde, emprise importante) ou une intrusion dès la première phase érosive jusqu'aux déchets stockés (chantier routier, résidence). Outre l'ampleur des travaux qui conditionne la quantité de déchets considérée pour le scénario de résidence, l'Andra fait l'hypothèse d'une dilution de ceux-ci lors de l'excavation pour former les déblais déposés en surface (mélange de matériaux détritiques issus de colis de déchets et d'autres matériaux du stockage dont la couverture) puis avec 85 % de matériaux d'apports extérieurs (*i.e.*, non contaminés) nécessaires à la construction de l'habitation. PSE-ENV estime, comme à l'issue de l'expertise du dossier de réexamen de sûreté de 2019 du Centre de stockage de la Manche (CSM), que la proportion de déchets dans la composition du sol retenue pour le scénario de résidence avec jeux d'enfants apparait de fait particulièrement faible ; l'Andra avait alors pris l'engagement de justifier ce paramètre. PSE-ENV convient de la difficulté de définir des scénarios conventionnels qui, par essence, reposent sur des choix arbitraires d'hypothèses du fait de fondements scientifiques limités pour prédire la nature des intrusions et les définir. Ces scénarios doivent intégrer un certain degré de conservatisme, sans toutefois être extrêmes, afin d'être en mesure de répondre aux objectifs de l'évaluation des SIHI, à savoir évaluer la robustesse du système de stockage vis-à-vis d'évènements intrusifs (tout ou partie des barrières « effacées ») ainsi que le niveau acceptable d'activité dans le stockage. Le caractère raisonnable des scénarios retenus étant délicat à établir, le recours à une analyse de sensibilité aux hypothèses et paramètres les plus influents est alors utile pour éprouver la robustesse du système ainsi que l'inventaire acceptable et objectiver leur appréciation selon le degré de conservatisme. Aussi, **PSE-ENV considère que, dans le DOS, l'Andra devrait compléter son analyse des SIHI banals par une analyse de sensibilité à l'atteinte des déchets stockés dès la première phase érosive pour la construction d'une route et d'une résidence ainsi qu'à la proportion de déchets dans le sol pour le scénario de résidence.**

Pour analyser l'impact radiologique associé aux différents SIHI, l'Andra retient un objectif de protection de 20 mSv/an. Pour les toxiques chimiques, elle retient les mêmes objectifs de protection en termes d'ERI et de QD que pour le SEN (respectivement 10^{-5} et 1), tout en considérant l'impact comme « acceptable » lorsque l'ERI est inférieur à 10^{-4} et le QD inférieur à 5. L'Andra précise que ces dernières valeurs, lorsqu'elles sont dépassées, correspondent à un état des milieux qui n'est plus compatible avec les usages actuels ou envisagés pour les sols considérés (*e.g.,* usage industriel, tertiaire, résidentiel, récréatif de plein air, agricole) d'après le guide de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) sur les sites et sols contaminés[26].

S'agissant de l'objectif de protection radiologique, PSE-ENV relève que la valeur retenue par l'Andra est conforme aux préconisations internationales *(e.g.*, norme SSR-5 de l'AIEA) et recommandé par le GPD[6]. En revanche, le dépassement des objectifs de protection relatifs aux toxiques chimiques (ERI de 10^{-5} et QD de 1), s'il peut être toléré dans certaines situations spécifiques (groupe de personnes spécifiques, situation transitoire…), ne parait pas adapté à un stockage de déchets radioactifs après la perte de mémoire de celui-ci. En effet, les dispositions actives sous-tendues par cette relaxe des objectifs de protection, qu'il s'agisse de contrôles renforcés des émissions, d'adaptation de leur gestion, voire d'actions de remédiation, ne sauraient être considérées comme mobilisables dans le cas d'un stockage dont la mémoire est perdue. A cet égard, PSE-ENV précise que contrairement à la réglementation relative aux stockages relevant du régime des installations nucléaires de base, la réglementation associée aux installations classées pour la protection de l'environnement, desquelles dépendent les stockages de déchets dangereux gérant les substances toxiques chimiques, ne couvre pas les évaluations d'impact à long terme (siècles à milliers d'années). De fait, elle ne postule pas la perte de mémoire bien que les risques liés aux substances toxiques chimiques soient de même nature dans les deux types de stockage. Pour autant, les normes et guides relatifs aux stockages de déchets radioactifs sont peu disants s'agissant de l'impact associé aux toxiques chimiques en situation d'intrusion humaine involontaire banale. Leurs principes généraux de

[25] A titre d'illustration, le guide de sûreté SSG-23 de l'AIEA indique que la plupart des activités humaines (*e.g.,* travaux de construction, agriculture…) qui pourraient conduire à une intrusion humaine involontaire dans un stockage de déchets radioactifs ont lieu à des profondeurs limitées à quelques dizaines de mètres (généralement entre 30 et 50 m sous la surface) et qu'une intrusion jusqu'à 30 m peut être considérée comme très probable lorsqu'il s'agit de faire des évaluations sur de longues périodes.
[26] https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Ineris_GuideERS-Juillet2021-A4-%2310Quatro_Web.pdf

protection visent de fait en premier lieu les risques radiologiques et se fondent sur la décroissance radioactive. Le respect des objectifs de protection radiologique, avec une gestion au mieux des autres risques, pourrait donc être estimée suffisante en considérant le gain probant en termes de protection déjà apportée sur le volet radiologique. A l'inverse, la protection passive des populations sur le long terme peut être perçue comme devant être garantie qu'il s'agisse de risque radiologique ou chimique. Les éléments de doctrine en la matière, qui relève d'un cadre plus large que celui de la présente saisine, mériteraient donc d'être élaborés et formalisés plus avant. **Aussi, PSE-ENV estime que l'appréciation, dans le contexte des stockages de déchets radioactifs, de l'acceptabilité d'un dépassement des objectifs de protection vis-à-vis des substances toxiques chimiques dans le cas de scénarios d'intrusion humaine banale consécutive à la perte de mémoire du site, nécessite de reposer sur des éléments de doctrine qui restent à développer.** Ce développement pourrait être conduit dans un premier temps par un GT pluraliste qui réunirait des acteurs des domaines nucléaire et non nucléaire de compétences ad hoc (toxicologie radiologique et chimique, sûreté de la gestion de déchets et polluants, réglementation…). Il pourrait y être discuté par exemple, la pertinence de relâcher le niveau d'exigence toxicologique pour l'examen de ce type de scénario (*i.e.*, QD <5), la réduction des facteurs de sécurité pris en compte dans l'élaboration des valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour des scénarios incertains à long terme (cf. ci-dessous), ou encore le choix de l'effet critique (radiologique, chimique) à prendre en compte.

S'agissant des résultats de l'évaluation de l'impact sanitaire radiologique menée par l'Andra (cf. Tableau 1 en Annexe 2), ceux-ci montrent que, dans le cas du SIHI « voie eau », les estimations de l'impact radiologique associé aux déchets radifères respectent l'objectif de protection de 20 mSv/an seulement pour les configurations SSO (dans lesquelles le stockage est moins compact) et en tenant compte d'une élimination au préalable des sels présents dans les déchets. L'Andra a toutefois précisé au cours de l'expertise qu'une évolution de la géométrie du massif de colis stockés dans la configuration SCO pourrait conduire à diminuer les impacts associés. **Ces éléments n'appellent pas de remarque.** Dans le cas des SIHI « voie air », les évaluations d'impact dosimétrique conduisent, lorsqu'il est considéré un mélange homogène de l'ensemble des déchets radifères (toutes familles confondues), à des doses maximales inférieures à 2 mSv/an (cas du scénario consistant en un chantier routier associé à une résidence et à des jeux d'enfants sur les déblais issus de ce chantier). En complément à ces évaluations, l'Andra a étudié l'impact associé à chaque famille de déchets prise isolément, dans l'objectif d'identifier les familles susceptibles de conduire aux impacts les plus importants. Cette étude montre qu'un scénario de chantier routier interceptant les familles i) de déchets composés de regroupement de sources au radium et à l'américium provenant de paratonnerres ou de détecteurs incendie[27], ii) de déchets de la défense nationale[28] ou iii) de « sulfates de plomb radifères »[29] (familles de déchets du CEA actuellement catégorisées MA-VL et qui représentent à elles seules plus de 65 % de l'activité totale des déchets radifères, cf. Annexe 3), conduirait à un dépassement de l'objectif de protection de 20 mSv/an[30]. Aussi, l'Andra prévoit d'exclure tout ou partie de ces familles de l'inventaire des déchets à stocker sur le site de la CCVS, ce qui représente une réduction de l'inventaire en volume de déchets conditionnés de l'ordre de 1 %. **PSE-ENV convient du bien-fondé de cette exclusion** et n'a pas de remarque particulière s'agissant de l'évaluation associée aux autres familles.

S'agissant de l'impact sanitaire associé aux toxiques chimiques, PSE-ENV constate que l'Andra a réalisé des évaluations pour les SIHI « voie air » uniquement. Les résultats sont, pour un certain nombre de familles, significativement supérieurs aux objectifs de protection (QD jusqu'à 36[31]). L'Andra précise à cet égard que des travaux ultérieurs examineront dans quelle mesure les conservatismes associés à ces évaluations pourraient être réduits afin de s'assurer *in fine* du caractère acceptable des familles engendrant les impacts sanitaires chimiques les plus importants, notamment ceux produits par l'usine de Framatome Jarrie. **PSE-ENV estime, comme l'Andra, que ces évaluations d'impact sanitaire chimique doivent être consolidées, avec une attention particulière portée à leur niveau de conservatisme.** A cet égard, les facteurs de sécurité intégrés aux VTR utilisées pour le calcul du QD, qui visent à couvrir les incertitudes relatives aux conditions d'acquisition des

[27] Familles AND-7000 et AND-7010
[28] Famille AND-7020
[29] Familles CEA-231 et CEA-232
[30] Impacts, selon les familles, pouvant atteindre plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mSv/an.
[31] QD inhalation maximal de 36 lié à l'uranium pour la famille COG-4002 et QD ingestion maximal de 106 pour l'enfant de 1 an lié au plomb pour la famille CEA-232 que l'Andra prévoit déjà d'exclure sur la base de l'évaluation radiologique des SIHI.

résultats expérimentaux et à leur interprétation, constituent des marges qui pourraient être explorées. **Enfin, il conviendra que l'Andra complète son évaluation en tenant compte de la « voie eau ».**

4.2. EVALUATIONS D'IMPACT ASSOCIEES A LA SECONDE PERIODE D'EVOLUTION GEODYNAMIQUE DU STOCKAGE

Pour la seconde période d'évolution géodynamique du stockage, l'Andra évalue l'impact sanitaire radiologique *via* deux situations conventionnelles visant chacune à représenter une dégradation instantanée, à 50 000 ans, des performances de la couverture. La première situation consiste en une altération majeure de la fonction de sûreté « limiter le transfert des radionucléides » et est représentée par une dégradation notable des paramètres hydro-dispersifs des 20 m de couverture résiduelle, induisant un flux d'eau descendant plus important. L'Andra base son évaluation sur la situation « enveloppe » du SEN pour les autres paramètres, en considérant le puits dans la nappe des Sables verts comme exutoire. La seconde situation, visant à représenter une altération majeure de la fonction de sûreté « isoler les déchets de l'homme et de l'environnement », consiste en une mise à nu du stockage résultant d'une érosion totale de la couverture et repose sur les paramètres du SEN « de référence ». En effet, ces derniers conduisant à simuler une migration moins rapide des radionucléides hors du stockage en comparaison du SEN enveloppe, le terme source de radionucléides encore présents dans le stockage à 50 000 ans est ainsi pénalisant. Le sol contaminé qui résulte de la mise à nu du stockage est supposé être utilisé à des fins de culture ou d'élevage. Comme dans le cadre du SIHI « résidence », l'Andra prend en compte un sol contaminé constitué de 15 % de matériaux détritiques issus du stockage et 85 % de matériaux extérieurs au système de stockage, justifiant cette fois cette dilution par un apport de matériaux naturels déposés sur le site par érosion de collines alentours ; l'Andra a précisé au cours de l'expertise qu'une dilution réduite à 60 % conduirait à une augmentation de l'impact d'un facteur proche de 3.

S'agissant des deux situations considérées, PSE-ENV estime que la première situation représente convenablement le cas d'une dégradation notable de la couverture compte tenu de l'importance des incertitudes associées à la seconde période d'évolution géodynamique. PSE-ENV relève en outre le caractère extrême de la seconde situation en termes de disparition soudaine et totale de la couverture. Néanmoins, PSE-ENV estime que le taux de dilution du sol contaminé (85 %) par apport de dépôts issus des érosions environnantes, paramètre influent du calcul d'impact, est particulièrement élevé compte tenu notamment de la configuration topographique actuelle de la zone d'implantation possible du stockage, située sur un plateau en zone haute. Aussi, en vue des évaluations d'impact à réaliser au stade du DOS, PSE-ENV encourage l'Andra à poursuivre les études relatives à l'évolution géodynamique de la zone restreinte au-delà de 50 000 ans, telles que celles initiées via l'approche LEM (cf. chapitre 1 du présent avis), afin de mieux appréhender les mécanismes de dilution considérés pour le sol contaminé dans la situation conventionnelle de mise à nu de la couverture. **En tout état de cause, PSE-ENV considère que l'Andra devrait, dans le DOS, présenter une analyse de sensibilité de l'impact radiologique estimé à la proportion de déchets dans le sol pour la seconde période d'évolution géodynamique du stockage**.

S'agissant des évaluations d'impact associées à ces deux situations, réalisées par l'Andra sans considérer une élimination des sels des déchets, les résultats (cf. Tableau 1 en Annexe 2) conduisent à des impacts jugés acceptables par l'Andra car limités à 4 mSv/an pour toutes les situations et configurations étudiées, sauf dans le cas de la situation de mise à nu du stockage pour la configuration SCO (mise en jeu d'une densité plus importante de déchets) où il s'élève à 16 mSv/an. Pour cette situation, l'Andra indique que l'impact pourrait être réduit avec une répartition initiale optimisée de ces déchets. Enfin, au-delà de ces évaluations basées sur des transferts de substances par la voie eau, l'Andra a également étudié l'impact de l'implantation d'une résidence sur le stockage après érosion totale de la couverture, en se basant de manière pénalisante sur la configuration SCO. Les résultats associés, transmis au cours de l'expertise, conduisent à un impact de l'ordre de 4 mSv/an pour un terme source correspondant à une échéance de 100 000 ans.

PSE-ENV convient, en cohérence avec la Note ASN de 2008 et l'avis du GPD mentionné *supra*[6], du caractère acceptable de niveaux d'impact de l'ordre de quelques mSv/an pour les situations conventionnelles compte tenu du niveau de conservatisme général qui leur est associé. PSE-ENV note en outre que l'Andra prévoit de modifier l'agencement des déchets dans la configuration SCO afin de diminuer l'impact associé si cette configuration était maintenue au stade du DOS. Enfin, **PSE-ENV considère que l'impact associé à l'implantation d'une**

résidence sur le stockage après érosion totale de la couverture devrait être évalué dès l'occurrence supposée de la mise à nu du stockage, soit sur la base du terme source résiduel à 50 000 ans au lieu de celui à 100 000 ans actuellement retenu par l'Andra.

4.3. EVALUATION DES CONCENTRATIONS EN RADON DANS UNE HABITATION AU DROIT DU STOCKAGE

S'agissant de la première période d'évolution géodynamique du stockage, l'Andra évalue les expositions au radon 222 généré par les déchets radifères, excavés lors du chantier routier à 50 000 ans, dans le cadre du SIHI « résidence », sur la base d'estimations de sa concentration dans l'habitation selon différentes hypothèses de répartition des déchets. Dans le cas d'une répartition homogène des déchets et en considérant que le radier de l'habitation n'atténue pas le flux de radon, cette estimation (330 Bq/m^3) conduit à un léger dépassement du niveau de référence[32] de 300 Bq/m^3. En tenant compte de chaque famille de déchets prise séparément, cette estimation aboutit au dépassement du niveau de référence pour quatre familles[33], avec des valeurs pouvant atteindre 20 000 Bq/m^3 pour une des familles que l'Andra prévoit d'exclure de l'inventaire (cf. *supra*) et 1 000 Bq/m^3 pour les trois autres familles. L'analyse de ces estimations par l'Andra montre en outre que les configurations SCO et SSO 6 m, qui tiennent compte d'un gerbage des déchets sur plusieurs niveaux (hauteur de 6 m), conduisent à des concentrations en radon plus importantes dans l'habitation que dans le cas du concept SSO 3 m qui ne contient qu'un niveau de colis.

Pour ce qui concerne les expositions associées à l'implantation d'une résidence sur le stockage pendant la seconde période d'évolution géodynamique du stockage, soit après une érosion totale de la couverture, les résultats transmis par l'Andra au cours de l'expertise conduisent à des concentrations en radon dans l'habitation pouvant atteindre 800 Bq/m^3 dans le cas d'une répartition homogène de déchets gerbés sur une hauteur de 6 m et lorsque le radier n'atténue pas le flux de radon.

PSE-ENV rappelle que, selon les conclusions du GT précité[5], l'évaluation de concentrations de radon dans l'air intérieur pour les scénarios d'habitation doit viser, dans un objectif d'optimisation, davantage à comparer différents concepts qu'à dimensionner un stockage de déchets FA-VL vis-à-vis du niveau de référence de 300 Bq/m^3. En effet, compte tenu des incertitudes liées à la modélisation des concentrations en radon dans l'air intérieur, il apparaît d'une manière générale difficile de garantir l'absence de dépassement de ce niveau de référence de manière précise, cette évaluation dépendant fortement de paramètres spécifiques difficilement prédictibles, tels que les caractéristiques des bâtiments (*e.g.,* présence ou non d'un vide sanitaire) ou les modes de vie des habitants (*e.g.,* aération, occupation des pièces), et reposant sur des modèles complexes tenant compte du transport diffusif et convectif du radon à l'interface sol/habitation. Aussi, **PSE-ENV estime que les résultats obtenus par l'Andra à ce stade ne remettent pas en cause la faisabilité du projet de stockage de déchets FA-VL à faible profondeur sur le site de la CCVS. Il appartiendra à l'Andra de préciser, dans le DOS, de quelle manière le critère d'exposition au radon est pris en compte, parmi d'autres, dans le choix du concept de référence retenu au stade de ce dossier.**

5. PROGRAMME D'ETUDES EN VUE D'ETABLIR LE DOSSIER D'OPTIONS DE SURETE

L'Andra présente dans le DOTS les études à mener pour la poursuite du développement du projet de stockage de déchets FA-VL sur le site de la CCVS. Ces études concernent notamment les besoins de connaissances complémentaires relatives à la zone retenue (*e.g.,* propriétés géomécaniques et géochimiques des Argiles tégulines, évolution géodynamique du site) et aux déchets (inventaire, conditionnement, traitement des sels). Ces éléments ont été complétés au cours de l'expertise, ainsi qu'indiqué *supra,* par la transmission d'une feuille de route présentant les grandes orientations du programme d'études, incluant les travaux de conception, ainsi que leur planification. La durée nécessaire à la conduite de l'ensemble des études est estimée à 5,5 ans, hormis pour ce qui concerne la faisabilité du traitement des sels dont les essais en laboratoire et sur pilote envisagés par Solvay, ainsi qu'indiqué au chapitre 2 ci-avant, sont programmés sur 7 ans.

[32] Le niveau de référence de 300 Bq/m^3 est issu de l'arrêté du 20 février 2019 relatif à l'exposition au radon dans les immeubles bâtis.
[33] COG-4001 et COG-4002, AND-7330 à environ 1000 Bq/m3 et une famille – AND-7020 – à 20 000 Bq/m3 (famille que l'Andra prévoit déjà d'exclure sur la base de l'évaluation des SIHI).

PSE-ENV observe que la majeure partie des besoins d'études complémentaires évoqués dans le présent avis sont bien identifiés dans la feuille de route transmise et sont accompagnés d'une articulation *a priori* cohérente entre les différentes études prévues. PSE-ENV attire toutefois l'attention sur le fait que les délais annoncés pour la démonstration de la faisabilité de traitement des sels ne sont pas compatibles avec la remise d'un DOS sous cinq ans après l'avis de l'ASNR sur la poursuite des études comme demandé par le PNGMDR. En outre, PSE-ENV souligne que le niveau de détail du programme des autres études n'est à ce stade pas suffisamment développé pour justifier de la faisabilité d'acquérir l'ensemble des connaissances requises pour établir un DOS sous le délai précité.

6. CONCLUSION

Le DOTS relatif à la faisabilité d'un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL sur le site de la CCVS constitue une avancée depuis le rapport d'étape de 2015, notamment s'agissant de l'évaluation de l'évolution géodynamique prospective de ce site et de l'état des lieux des dispositions constructives possibles pour une telle installation de stockage. Il confirme que les caractéristiques de ce site, en particulier s'agissant de l'épaisseur et des propriétés de la couche argileuse, ne permettent pas l'implantation d'un stockage accueillant l'ensemble des déchets FA-VL. Pour autant, PSE-ENV estime comme l'Andra que le stockage de la majeure partie des déchets radifères sur le site de la CCVS, après traitement des sels pour une part importante d'entre eux, reste envisageable à ce stade des études. Dans l'objectif de statuer sur la faisabilité d'un tel stockage, l'Andra devrait au stade du DOS apporter des éléments probants quant à la possibilité de traiter les sels et préciser les exigences de sûreté assignées aux différents composants du stockage. De manière plus générale, l'évaluation de sûreté après fermeture nécessiterait d'être poursuivie en tenant compte des points identifiés dans le présent avis, rappelés en Annexe 1. En outre, PSE-ENV attire l'attention sur l'importance de préciser le programme d'études au regard des jalons majeurs de développement du projet afin d'en établir le calendrier. Enfin, des éléments de doctrine restent à développer s'agissant de la protection vis-à-vis des substances toxiques chimiques sur le long terme en vue d'assoir l'appréciation de l'évaluation de leur impact.

Pour le Directeur de la recherche et
de l'expertise en environnement

Delphine PELLEGRINI

Adjointe au Directeur de la recherche et
de l'expertise en environnement



Signature numérique
de Delphine
PELLEGRINI

Annexe 1

Recommandations de la Direction de la recherche et de l'expertise en environnement

Recommandation n° 1

L'Andra devrait, dans le DOS, vérifier que la prise en compte de l'évolution des connaissances acquises depuis le projet BIOCLIM ainsi qu'une entrée en climat froid avec une répétition de cycles de gel/dégel ne remettent pas en cause la valeur enveloppe du taux d'érosion retenue dans le DOTS.

Recommandation n° 2

L'Andra devrait, dans le DOS, présenter des éléments conclusifs quant à la faisabilité d'un traitement pour réduire les concentrations en sels de manière significative lorsqu'ils sont contenus en proportion importante dans les déchets radifères.

Recommandation n° 3

L'Andra devrait, dans le DOS, définir les exigences associées aux performances des composants du stockage, notamment celles associées à la garde supérieure du stockage (couverture en argile remaniée ou formation géologique en place). L'Andra devrait en outre justifier que ces exigences pourront être atteintes pour la configuration qui sera retenue en référence.

Recommandation n° 4

L'Andra devrait, dans le DOS, compléter son analyse des SIHI banals par une analyse de sensibilité à l'atteinte des déchets stockés dès la première phase érosive pour la construction d'une route et d'une résidence ainsi qu'à la proportion de déchets dans le sol pour le scénario de résidence.

Recommandation n° 5

L'Andra devrait, dans le DOS, présenter une analyse de sensibilité de l'impact radiologique estimé à la proportion de déchets dans le sol pour la seconde période d'évolution géodynamique du stockage.

Recommandation n° 6

Dans le cadre des évaluations associées à la seconde période d'évolution géodynamique du stockage à présenter dans le DOS, l'Andra devrait évaluer l'impact associé à l'implantation d'une résidence sur le stockage après érosion totale de la couverture dès l'occurrence supposée de la mise à nu du stockage.

Annexe 2
Figures et tableaux

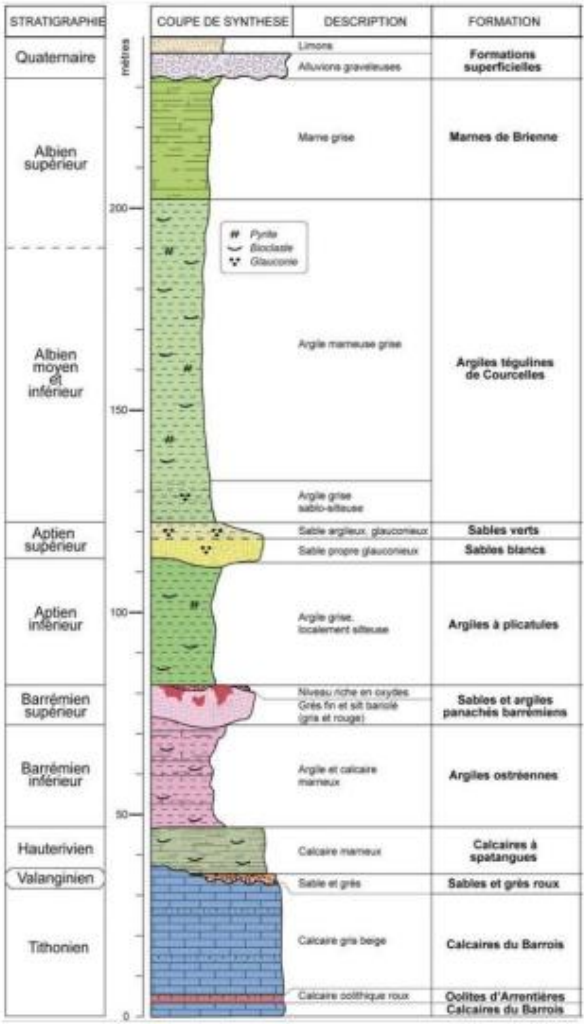


Figure 1 - Log géologique synthétique des formations crétacées présentes sur la CCVS [Andra, Projet de stockage de déchets FA-VL – Rapport d'étape 2015]

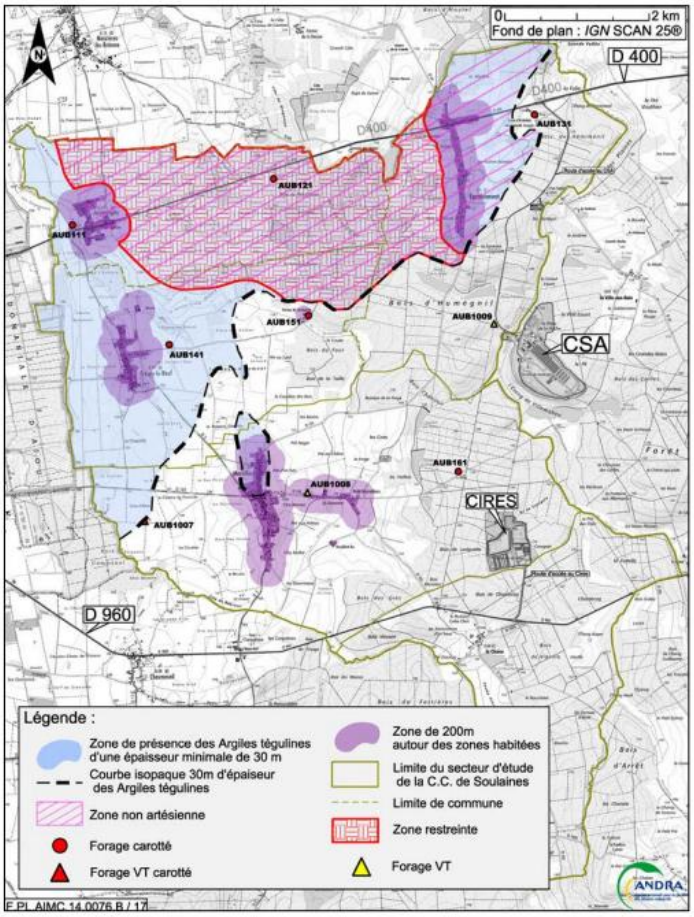


Figure 2 - Périmètre de la zone restreinte de 10 km² sélectionnée en 2015 pour la suite des études [Andra, Projet de stockage de déchets FA-VL – Rapport d'étape 2015]

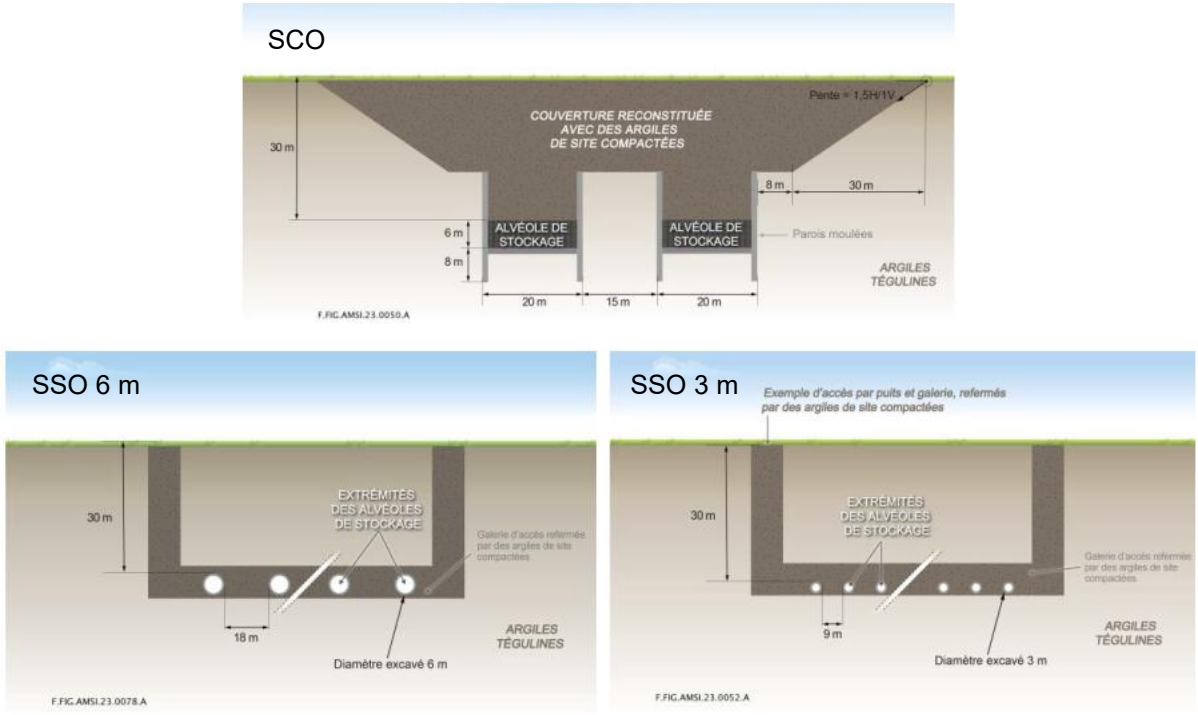


Figure 3 - Illustration des configurations de stockage étudiées pour les évaluations de sûreté après-fermeture. Haut : architecture à ciel ouvert. Bas : architectures souterraines [Andra, DOTS, modifié]

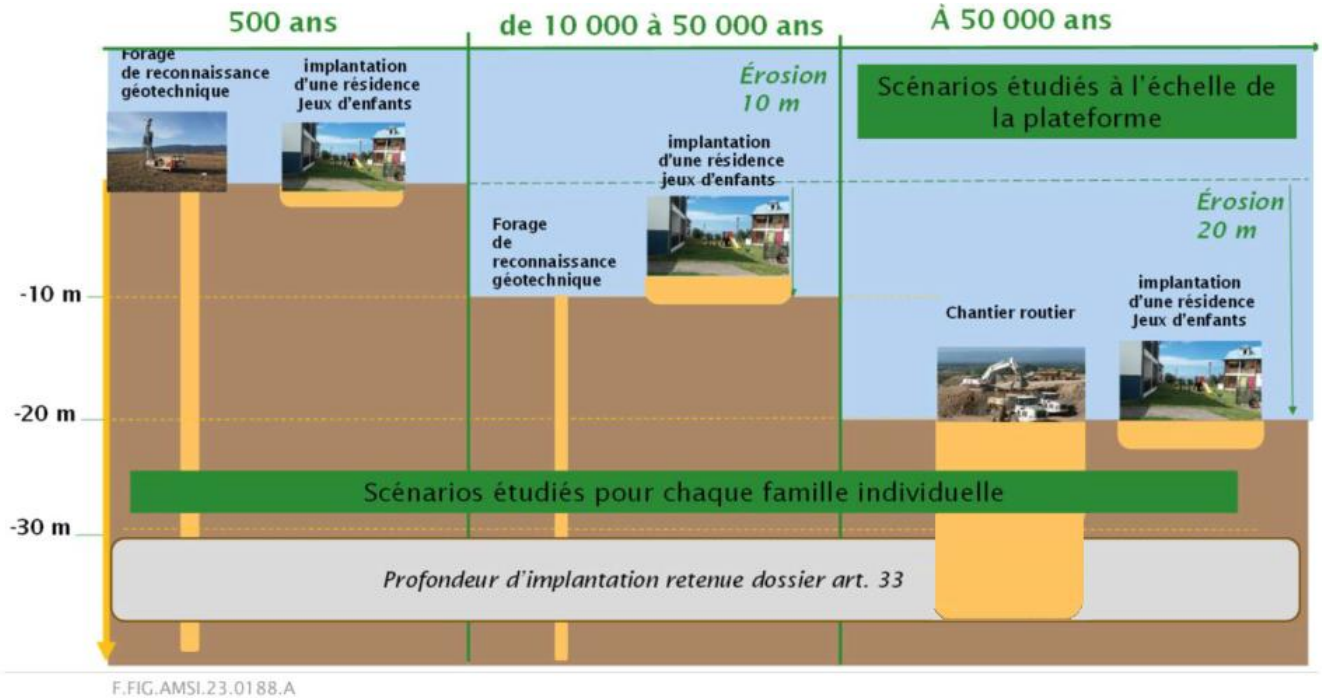


Figure 4 - Illustration des scénarios d'intrusion humaine involontaire étudiés [Andra, DOTS, modifié]

Tableau 1 – Impacts maximaux (biosphère chaude) et marquage chimique de la nappe estimés par l'Andra selon les différents scénarios d'évolution du stockage de déchets radifères ou d'intrusion et configurations de stockage étudiées

Scénario		**Indicateurs de protection**	**Impacts radiologiques maximaux**		
			Stockage souterrain Alvéoles de 6m	Stockage souterrain Alvéoles de 3m	Stockage à ciel ouvert
SEN de référence	avec sels	*0,25 mSv/an*	<10-7	<10-5	<10-10
	sans sels		<10-11	<10-5	<10-11
SEN enveloppe	avec sels		0,11	**1,15**	0,07
	sans sels		0,007	**1,1**	0,001
SIHI voie eau	avec sels	*20 mSv/an*	**50**	**24**	**265**
	sans sels		13	11	**60**
SIHI voie air	Chantier routier suivi d'une résidence et de jeux d'enfants sur les déblais		1,7	1	1,7
Situation conventionnelle post 50 000 ans Altération de la fonction "limiter le transfert des RN"		*"quelques mSv/an" pour l'Andra*	1	4	0,6
Situation conventionnelle post 50 000 ans Altération de la fonction "isoler les déchets"			3,5	0,75	**16,5**

Scénario			**Indicateurs de protection**	**Impacts chimiques maximaux (QD ingestion)**		
				Stockage souterrain Alvéoles de 6m	Stockage souterrain Alvéoles de 3m	Stockage à ciel ouvert
SEN enveloppe	Sélénium	avec sels	*QD < 1*	**2,9**	**2,2**	**4,4**
		sans sels		**2,7**	**2,2**	**4,1**
	Uranium	avec sels		**2,6**	**18,8**	0,3
		sans sels		0,009	**18,7**	0,003
	Bore	avec sels		0,5	0,3	**1,3**
		sans sels		0,5	0,3	**1,3**

Scénario		**Indicateurs de protection**	**Marquage chimique de la nappe induit par la présence des sels**		
			Stockage souterrain Alvéoles de 6m	Stockage souterrain Alvéoles de 3m	Stockage à ciel ouvert
SEN enveloppe	nitrates	*100 mg/L*	45	34	92
	ammonium	*4 mg/L*	1,3	1	3

Scénario		**Indicateurs de protection**	**Concentration volumique d'activité en radon dans l'habitation (radier inefficace)**		
			Stockage souterrain Alvéoles de 6m	Stockage souterrain Alvéoles de 3m	Stockage à ciel ouvert
SIHI mélange homogène	Forage géotechnique à 500 ans	*300 Bq/m3*	S.O.	S.O.	S.O.
	Forage géotechnique à 10 000 ans		S.O.	S.O.	S.O.
	Chantier routier à 50 000 ans		**330**	?	**330**
SIHI étude par famille	Forage géotechnique à 500 ans		**18000**	**9200**	**18000**
	Forage géotechnique à 10 000 ans		**450**	21,5	**450**
	Chantier routier à 50 000 ans		**21000**	**13000**	**21000**
Situation conventionnelle post 50 000 ans Altération de la fonction "isoler les déchets"			**800** (concept non précisé)		

Annexe 3
Déchets radifères

Les déchets radifères sont en grande majorité déjà produits et entreposés soit sur le site où ils ont été produits ou le site d'un exploitant nucléaire, soit dans la zone d'entreposage dédiée du Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de l'Andra.

Le Tableau 2 ci-dessous montre que trois activités industrielles exploitées par Solvay (anciennement Rhodia), le CEA et Framatome sont à l'origine de 88 % du volume total (74 888 m^3) des déchets radifères et de plus de 91 % de leur activité radiologique cumulée (estimée à quelques 10^{13} Bq à l'horizon 2050). Les 12 % restants (en volume) des déchets radifères concernent les substances radioactives d'origine naturelle (SRON), les déchets issus de l'assainissement d'anciens sites pollués et les déchets divers issus de petits producteurs ou du nucléaire diffus ; ces déchets sont regroupés en 10 familles. Il est à noter que la famille AND-7100 est constituée de déchets d'assainissement dont l'activité est essentiellement due au carbone 14 et, dans une moindre mesure, à du tritium. En outre, les familles CEA-231 et CEA-232 regroupant les sulfates de plomb radifères, de catégorie MA-VL et actuellement dans l'inventaire de référence de Cigéo, ont été intégrées dans cette étude par l'Andra à la demande des producteurs en raison de leurs caractéristiques proches de la catégorie FA-VL[34].

La production de la plupart des déchets radifères se poursuivra jusqu'en 2030 en lien avec les opérations d'assainissement de sites et sols pollués, et jusqu'en 2050 pour le cas des déchets issus de l'industrie du zirconium. D'après les données du dossier, environ 60 % des déchets radifères (en masse et en volume) ont déjà été produits et conditionnés, 26 % sont à reprendre et à conditionner, et 14 % ne sont pas encore produits.

En plus des quantités de substances toxiques chimiques pour chaque famille de déchets, l'Andra rapporte dans son dossier les quantités de substances chimiques complexantes et/ou agressives qu'elles renferment. Les espèces complexantes présentes en quantité significative dans les déchets radifères sont les carbonates (4 322 tonnes), les sulfates (1 976 tonnes), les phosphates (1 078 tonnes), les chlorures (682 tonnes) et les nitrates (540 tonnes). Les espèces agressives comptabilisées par l'Andra sont en quantité moindre, les principales étant l'aluminium (318 tonnes), l'ammonium (147 tonnes) et le zinc (132 tonnes). Les déchets de Solvay (familles RHO) sont les contributeurs majeurs à l'inventaire des **sels d'ammonium, sulfates, nitrates** avec de l'ordre de 80 % de la masse totale (respectivement 79,3 %, 85 % et 80 %) de ces espèces chimiques comptabilisée dans les déchets radifères. Les 20 % restants sont apportés par les déchets d'Arkema (AND-7351). Ces déchets représentent un volume de respectivement 29 781 m^3 et 5 467 m^3 soit 39,8 et 7,3 % du volume total de déchets.

[34] En réponse à l'article n°27 de l'arrêté PNGMDR du 9 décembre 2022, l'Andra a établi des critères objectifs, en termes d'activité radiologique contenue dans les déchets, permettant de discriminer les déchets relevant de la filière FA-VL de ceux relevant de la filière MA-VL.

Tableau 2 – Description des différentes familles de déchets radifères

Détenteur / site	Origine des déchets	Familles / Etat de production	Pourcentage du volume de déchets des familles par rapport au volume total de déchets radifères (volume conditionné)	Pourcentage de l'activité des déchets des familles par rapport à l'activité totale des déchets radifères
Solvay Site de La Rochelle	Extraction de terres rares de la monazite ou des hydroxydes bruts de thorium	RHO-4000* / produits RHO-4010* / produits RHO-4021* / à produire	~40%	11,4%
CEA Site d'Itteville	Traitement de minerais d'uranothorianite	CEA-231** / produits CEA-232** / produits CEA-4000* / à reprendre	25% (24 % dus aux résidus et boues de la famille CEA-4000)	70% (~ 65 % dus aux sulfates de plomb radifères des familles CEA-232 et dans une moindre mesure CEA-231)
Framatome Site de Jarrie	Traitement de minerais de zircon puis d'oxyde de zirconium	COG-4001 COG-4002 (déjà produits et à produire jusqu'en 2050)	23%	9,7%
Andra Cires ou **Détenteur** Site de production	Déchets issus de l'assainissement de sites pollués	AND-4100 AND-4200 AND-7100	12%	8,7%
	Déchets de petits producteurs non électronucléaires ou du nucléaire diffus	AND-7000*** AND-7010*** AND-7330		
	Déchets de la défense nationale	AND-7020		
	Déchets contenant des substances radioactives d'origine naturelle (SRON)	AND-7350 AND-7351 (Arkema) AND-7450		

* Familles de déchets contenant des quantités significatives de sels de nitrates, sulfates, et ammonium
** Colis de sulfates de plomb radifères
*** Déchets issus des détecteurs de fumée (AND-7000) et sources Am241, Ra226 et mixtes issues des paratonnerres (AND-7010)