2021

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo

Pièce 8

Avis émis sur le projet de centre de stockage Cigéo et réponses de l'Andra

Annexe 1 – Mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale

ANDRA
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Mise à jour du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo

Suite aux recommandations émises dans le cadre du processus d'évaluation environnementale et notamment suite à l'avis de l'Autorité environnementale (Ae), des mises à jour ont été apportées par l'Andra dans certaines pièces du dossier (déposé pour instruction le 3 août 2020[1]) avant son passage en enquête publique.

Pour assurer la clarté de l'information du public, l'Andra assure la traçabilité de ces mises à jour.

Toutes les adaptations (modifications ou ajouts) se matérialisent par un surlignage gris dans le corps du texte, les corrections mineures de forme et de mise en cohérence ne sont pas matérialisées.

[1] Pour information, le dossier soumis à instruction a été rendu public sur le site internet de l'Andra - **https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference**

Sommaire

1. Objet 5

1.1 Cadre juridique de la désignation de l'Autorité environnementale compétente *6*

1.2 Avis de l'Autorité environnementale du conseil général de l'environnement et du développement durable *6*

1.3 Objet et structure du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale *6*

1.3.1 Objet du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale 6

1.3.2 Structure du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale 6

1.3.3 Principes retenus pour le dossier soumis à enquête publique 9

1.3.4 Rappel sur la terminologie employée dans le document 10

2. Avis de l'Ae intégrant les réponses de l'Andra 13

Annexes 105

Annexe 1 Synthèse des options de sureté *106*

Annexe 2 Programme des études de conception, de R&D et de sûreté depuis les options de sûreté en vue du dossier d'autorisation de création et de son instruction *189*

2.1 La feuille de route de l'Agence jusqu'à la DAC, intégrant les demandes de l'ASN et les engagements de l'Andra repris dans la lettre de l'ASN du 12 janvier 2018 faisant suite à l'instruction du DOS *189*

2.2 Cas particulier des déchets bitumés mentionnés dans la lettre de suite de 2018 *189*

Tables des illustrations 191

Références bibliographiques 193

1

Objet

1.1 Cadre juridique de la désignation de l'Autorité environnementale compétente 6

1.2 Avis de l'Autorité environnementale du conseil général de l'environnement et du développement durable 6

1.3 Objet et structure du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale 6

1.1 Cadre juridique de la désignation de l'Autorité environnementale compétente

L'Autorité environnementale compétente pour chaque projet est déterminée selon les critères fixés à l'article R. 122-6 du code de l'environnement, et en particulier l'article R. 122-6, I :

« L'autorité environnementale mentionnée à l'article L. 122-1 est […] 2° La formation d'autorité environnementale du Conseil général de l'environnement et du développement durable :

a) Pour les projets qui donnent lieu à une décision d'autorisation, d'approbation ou d'exécution du ministre chargé de l'environnement ou à un décret pris sur son rapport ;

b) Pour les projets qui sont élaborés : […] -sous maîtrise d'ouvrage d'établissements publics relevant de la tutelle du ministre chargé de l'environnement, ou agissant pour le compte de celui-ci ; »

Ainsi, en application des dispositions de l'article R. 122-6 du code de l'environnement et du fait du statut de l'Andra, établissement public industriel et commercial (EPIC) en application de l'article L. 542-12 du code de l'environnement, l'autorité environnementale (Ae) désignée pour le projet de centre de stockage Cigéo est le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) créé en 2008.

Comme le précise le site du ministère de la transition écologique, *« L'avis rendu par cette autorité vise à permettre au maître d'ouvrage d'améliorer son projet, à éclairer la décision d'autorisation, au regard des enjeux environnementaux des projets, plans et programmes. L'avis permet également de faciliter la participation du public à l'élaboration des décisions qui le concernent, conformément à la charte de l'environnement, l'avis étant joint au dossier d'enquête publique ou de la procédure de participation du public par voie électronique.* » (1)

1.2 Avis de l'Autorité environnementale du conseil général de l'environnement et du développement durable

L'Ae du CEGDD a été saisi par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) le 16 octobre 2020 sur la base du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo déposé pour instruction par l'Andra le 3 août 2020.

L'Ae s'est réunie le 13 janvier 2021 afin de rendre l'avis référencé n° 2020-79 (2). Il est repris dans son intégralité dans le chapitre 2.1 de la pièce 8 du présent dossier d'enquête publique préalable à la DUP.

L'avis porte sur la qualité de l'évaluation environnementale et sur la prise en compte de l'environnement par le projet de centre de stockage Cigéo.

L'Ae note qu'il « *s'agit d'un dossier d'une ampleur peu commune, dont l'étude d'impact est déjà très importante* » et que « *l'évaluation environnementale est très détaillée et prend soin d'expliciter de façon didactique les questions techniques abordées* ».

Cet avis porte à la fois un avis général sur la qualité de l'étude d'impact et formule 40 recommandations, mais aussi des questionnements, détaillés dans le texte et non repris dans les recommandations.

Pour certaines recommandations, l'Ae précise bien qu'elles seront à traiter lors de l'actualisation ultérieure de l'étude d'impact du projet global Cigéo au stade des différentes dossiers réglementaires à la charge de l'Andra et des autres maitres d'ouvrages: « *L'Andra précise que l'étude d'impact présentée sera actualisée au fur et à mesure des demandes d'autorisation en prenant notamment en compte leurs impératifs spécifiques. L'Ae confirme que cette vision est la seule appropriée pour assurer l'information du public et du législateur sur les enjeux environnementaux tout au long du projet. Cette actualisation motivera des saisines successives de l'Ae. Il conviendra que les modifications soient datées et tracées et leurs raisons explicitées* » (page 8 de l'avis 2020-79).

1.3 Objet et structure du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale

1.3.1 Objet du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale

Comme prévu par l'article L. 122-1 VI du code de l'environnement, le présent mémoire constitue la réponse du maître d'ouvrage du centre de stockage Cigéo à l'avis délibéré 2020-79 de l'Ae du CEGDD délivré en application de l'article L. 122-1 V du code de l'environnement.

Il apporte les précisions et compléments de l'Andra suite aux différentes recommandations émises par l'Ae du CGEDD.

1.3.2 Structure du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale

Pour faciliter la lecture de ce mémoire et la prise de connaissance des réponses apportées aux recommandations de l'Ae, l'Andra a choisi la mise en forme suivante :

- à partir du chapitre 2 du présent mémoire, l'avis 2020-19 est repris intégralement sous format d'image ;
- les réponses apportées par l'Andra sont signalées dans le corps du texte par un encart bleu.

Le titre de l'encart spécifie le numéro chronologique assigné à la recommandation considérée pour permettre de clarifier les renvois entre les réponses. Certains encarts apportent des réponses à des questionnements de l'Ae non repris dans les recommandations.

Le tableau ci-après établit la correspondance entre les recommandations de l'Ae et les réponses de l'Andra dans le présent mémoire.

Tableau 1-1 Correspondance entre l'avis de l'Ae et le mémoire en réponse de l'Andra

Détail de la recommandation émise par l'Ae	Numérotation	Emplacement de la recommandation dans l'avis de l'Ae	Réponse de l'Andra
L'Ae recommande d'inclure, dans l'analyse des impacts et des mesures environnementales, les activités de traitement, de conditionnement et de transport des déchets depuis les sites des producteurs .	R1	Chapitre 1.1 Contexte et périmètre du projet Page 8 sur 56	Page 17
L'Ae recommande, pour la clarté de l'information du public sur un dossier complexe dont les enjeux sont importants, que les modifications ultérieures apportées à l'étude d'impact dans le cadre de ses futures actualisations soient tracées de manière claire	R2	Chapitre 1.1 Contexte et périmètre du projet Page 8 sur 56	Page 21
L'Ae recommande de présenter la surveillance à long terme qui est prévue et les moyens employés pour diminuer les risques à long terme après fermeture du stockage.	R3	Chapitre 1.2.7 Enchaînement des opérations Page 11 sur 56	Page 23
L'Ae recommande de compléter le dossier par l'analyse de la composition chimique des matériaux qui seront extraits du sous-sol pour constituer les verses afin d'évaluer le risque de transfert de matières solides toxiques dans l'air et les eaux .	R4	Chapitre 2.1.1.3 Sous-sol Page 16 sur 56	Page 27

Détail de la recommandation émise par l'Ae	Numérotation	Emplacement de la recommandation dans l'avis de l'Ae	Réponse de l'Andra
L'Ae recommande de réévaluer l'enjeu que constitue la nappe de l'Oxfordien.	R5	Chapitre 2.1.1.4.1 Eaux souterraines Page 17 sur 56	Page 30
L'Ae recommande de produire la cartographie de l'aire potentielle d'influence des installations de surface et de la descenderie sur les eaux souterraines .	R6	Chapitre 2.1.1.4.1 Eaux souterraines Page 18 sur 56	Page 31
L'Ae recommande d'approfondir les possibilités de tracés pour la déviation de la route départementale D60/960, les canalisations d'adduction d'eau et le poste de transformation électrique du futur site afin de prendre en compte à un niveau approprié les enjeux relatifs aux zones humides et aux corridors de biodiversité dans le choix de la solution retenue pour l'implantation des installations de surface du centre de stockage.	R7	Chapitre 2.1.1.5.3 Continuités écologiques Page 22 sur 56	Page 34
L'Ae recommande également d'assigner à la continuité écologique un niveau d'enjeu moyen, et fort pour le bois Lejuc .	R8	Chapitre 2.1.1.5.3 Continuités écologiques Page 22 sur 56	Page 35
L'Ae recommande d'approfondir les analyses de la flore et la faune de la zone des postes de transformation et de leurs raccordements électriques et de requalifier le cas échéant l'enjeu qui leur a été attribué.	R9	Chapitre 2.1.1.5.3 Continuités écologiques Page 23 sur 56	Page 37
L'Ae recommande de compléter l'inventaire de la biodiversité de la ligne électrique et d'y associer le Conservatoire des espaces naturels de Champagne-Ardenne, gestionnaire de la réserve naturelle nationale de l'étang de la Horre.	R10	Chapitre 2.1.1.5.4 Habitats naturels, faune et flore Page 23 sur 56	Page 37
L'Ae recommande de procéder sans tarder à l'établissement de l'état actuel de la biodiversité sur les sites envisagés pour la mise en place du système d'adduction d'eau du centre Cigéo .	R11	Chapitre 2.1.1.5.4 Habitats naturels, faune et flore Page 23 sur 56	Page 38
L'Ae recommande de procéder à l'évaluation de l'état actuel de la biodiversité des variantes de la future emprise des zones traversées par la déviation de la route départementale D60/960 avant le choix de la variante à retenir.	R12	Chapitre 2.1.1.5.4 Habitats naturels, faune et flore Page 24 sur 56	Page 38
L'Ae recommande de justifier les services retenus pour l'évaluation des services écologiques et de quantifier les surfaces des écosystèmes présents localement concernées par chacun de ces services .	R13	Chapitre 2.1.2.3 Services écosystémiques Page 26 sur 56	Page 40
L'Ae recommande de présenter, dès le dépôt de la demande de déclaration d'utilité publique, un programme détaillé d'études complémentaires de maîtrise des risques et de surveillance, ainsi que d'indiquer les conclusions à atteindre, correspondant aux décisions à prendre à chacun des étapes.	R14	Chapitre 2.2.1 Opportunité d'engager dès à présent Cigéo Page 28 sur 56	Page 42
L'Ae recommande de comparer les avantages et les inconvénients environnementaux, y compris à très long terme, des différents types de stockage pour pouvoir démontrer que le choix de la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien est bien le plus adapté pour engager aujourd'hui l'avenir sur plusieurs millénaires.	R15	Chapitre 2.2.4 Les couches géologiques utilisables Page 30 sur 56	Page 45
L'Ae recommande de présenter plusieurs scénarios plausibles et contrastés de définition du gisement de déchets devant être stockés sur Cigéo, d'en analyser les avantages et inconvénients en termes de durée de vie, d'environnement et de sécurité et de justifier le parti retenu .	R16	Chapitre 2.2.5 Nature et choix des déchets à entreposer Page 30 sur 56	Page 50
L'Ae recommande de reprendre, une fois complétée, la connaissance de l'état actuel, la comparaison des incidences environnementales de plusieurs variantes d'implantation des différentes composantes du projet.	R17	Chapitre 2.2.6 Choix d'implantation des installations Page 35 sur 56	Page 52
L'Ae recommande : • de justifier, au regard du principe de précaution et du nécessaire contrôle de la société sur le stockage à long terme, le projet de développement du territoire qui en l'état actuel augmente le niveau d'enjeu face au risque d'exposition à la radioactivité et risque de banaliser le territoire ; • d'évaluer l'intérêt de solutions alternatives qui permettraient de diminuer le risque à très long terme et, à tout le moins, de déterminer les conditions d'une compatibilité à long terme entre l'activité de stockage et les autres activités du territoire.	R18	Chapitre 2.2.7 Les options de développement du territoire Page 33 sur 36	Page 58
L'Ae recommande de compléter le dossier par une évaluation des incidences environnementales et sanitaires à court, moyen et long termes liées aux fonctionnements en mode dégradé ou à l'occurrence de situations accidentelles pendant la phase de fonctionnement du site et ultérieurement.	R19	Chapitre 2.3 Analyse des incidences du projet et des mesures d'évitement, de réduction et de compensation Page 33 sur 56	Page 59
L'Ae recommande de porter l'analyse des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du projet, mais aussi au regard de celles de la filière nucléaire.	R20	Chapitre 2.3.1.1 Émissions de gaz à effet de serre Page 34 sur 56	Page 64
L'Ae recommande d'harmoniser les données du chapitre concernant les incidences sur la qualité de l'air avec celles du chapitre de l'évaluation des risques sanitaires en justifiant le cas échéant le recours à des modèles de dispersion différents.	R21	Chapitre 2.3.1.2 Qualité de l'air Page 35 sur 56	Page 65
L'Ae recommande de préciser la quantité cumulée de radionucléides dans les sols en fin d'exploitation, la nocivité associée, et leur devenir pendant la phase de stockage pérenne .	R22	Chapitre 2.3.1.3 Qualité des sols Page 36 sur 56	Page 67
L'Ae recommande de : • mieux caractériser le fonctionnement et la dynamique du fossé de Gondrecourt afin d'étayer la justification du lieu d'implantation des ouvrages souterrains ; • démontrer que le caractère asismique de la couche géologique de la zone d'implantation des ouvrages reste avéré à l'aune des nouveaux éclairages sur la sismicité en France à la suite du séisme du Teil en 2019.	R23	Chapitre 2.3.1.4.1 Stabilité du sous-sol Page 36 sur 56	Page 68

Détail de la recommandation émise par l'Ae	Numérotation	Emplacement de la recommandation dans l'avis de l'Ae	Réponse de l'Andra
L'Ae recommande de compléter l'étude d'impact par les principaux éléments du dossier d'options de sûreté concernant la fermeture du site afin d'informer complètement le public sur le risque de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien .	R24	Chapitre 2.3.1.4.2 Transfert des radionucléides dans le sous-sol Page 37 sur 56	Page 73
L'Ae recommande d'intégrer formellement la réversibilité du stockage à la mesure d'évitement qui consiste à déployer progressivement l'installation souterraine .	R25	Chapitre 2.3.1.4.2 Transfert des radionucléides dans le sous-sol Page 38 sur 56	Page 73
L'Ae recommande d'analyser de manière plus approfondie la compatibilité du projet avec le schéma régional des carrières et de fournir une estimation des origines des matériaux utilisés.	R26	Chapitre 2.3.1.4.3 Disponibilité des matériaux Page 38 sur 56	Page 74
L'Ae recommande d'augmenter les capacités de stockage des eaux de ruissellement .	R27	Chapitre 2.3.1.5.1 Mesures d'évitement et de réduction Page 40 sur 56	Page 77
L'Ae recommande de quantifier et qualifier les impacts potentiels et résiduels sur les eaux et de préciser les mesures ERC, leurs objectifs de résultats et les protocoles de suivi, et de les compléter pour les impacts des eaux de ruissellement et de percolation des verses.	R28	Chapitre 2.3.1.5.4 Conclusions de l'Ae sur la prise en compte de l'eau et des milieux aquatiques Page 40 sur 56	Page 79
L'Ae recommande d'approfondir la démarche ERC relative aux impacts quantitatifs sur la ressource en eau, en particulier pour ce qui concerne les possibilités de recharge de nappe et de réduction de l'artificialisation.	R29	Chapitre 2.3.1.5.4 Conclusions de l'Ae sur la prise en compte de l'eau et des milieux aquatiques Page 41 sur 56	Page 80
L'Ae recommande de mettre en œuvre la séquence éviter, réduire, compenser sur le corridor forestier régional qui traverse le bois Lejuc en prévision des impacts des premiers travaux de défrichement .	R30	Chapitre 2.3.1.6.5 Continuités écologiques Page 42 sur 56	Page 82
L'Ae recommande : • de justifier l'utilisation de la méthode miroir pour le calcul de la dette écologique, en lieu et place de la méthode préconisée par le ministère de la transition écologique ; • de faire évaluer et valider les propositions de quotas de compensation par un conseil scientifique indépendant ; • d'évaluer les besoins de compensation des zones humides sur la base de leur fonctionnalité ; • de revoir l'équivalence géographique sur des critères éco-géographiques et non administratifs.	R31	Chapitre 2.3.1.6.6 Mesures de compensation Page 43 sur 56	Page 84
L'Ae recommande de justifier l'absence de recherche de surfaces agricoles de substitution permettant d'éviter l'intensification et d'évaluer les incidences environnementales des projets de compensation agricole financés par le fonds de compensation, notamment pour ce qui concerne l'usage éventuel de fertilisants ou de pesticides ou d'intensification de l'exploitation, et de proposer des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation des impacts éventuels .	R32	Chapitre 2.3.2.1 Services écosystémiques Page 44 sur 56	Page 85
L'Ae recommande de compléter l'analyse des enjeux des sites Natura 2000 en ajoutant la ZPS FR2112001 « Herbages et cultures des vallées de la Voire, de l'Héronne et de la Laines ».	R33	Chapitre 2.4 Évaluation des incidences Natura 2001 Page 47 sur 56	Page 88
L'Ae recommande de préciser la nature des travaux qui seront réalisés sur la ligne électrique à 400 kV au droit des zones de protection spéciale du réseau Natura 2000 et de mettre en place le cas échéant des mesures d'évitement et de réduction supplémentaires afin de garantir l'absence d'incidences sur les oiseaux ayant permis la désignation de ces sites.	R34	Chapitre 2.4 Évaluation des incidences Natura 2001 Page 48 sur 56	Page 89
L'Ae recommande de corriger l'évaluation socio-économique en considérant comme référence que le projet Cigéo ne se fait pas.	R35	Chapitre 2.5 Évaluation économique et sociale des infrastructures de transport Page 49 sur 56	Page 92
L'Ae recommande de fournir un récapitulatif de l'ensemble des mesures de suivi du projet.	R36	Chapitre 2.6 Suivi du projet, de ses incidences, des mesures et de leurs effets Page 49 sur 56	Page 94
L'Ae recommande de prendre en compte dans le résumé non technique les conséquences des recommandations du présent avis et d'inclure des éléments sur le choix opéré parmi les diverses options.	R37	Chapitre 2.7 Résumé non technique Page 50 sur 56	Page 94
L'Ae recommande de produire, dès cette première version de l'étude d'impact, une première analyse des risques accidentels liés au projet, en particulier des éléments structurants et déterminants du rapport préliminaire de sûreté et d'une description des incidences négatives notables du projet à court, moyen et long termes, qui résultent de la vulnérabilité du projet à des risques d'accidents ou de catastrophes majeurs. Une évaluation des impacts directs ou indirects de tels accidents et le cas échéant, leur cartographie pour différents scénarios devrait être présentées dans le dossier de DUP.	R38	Chapitre 3.1 Traitement de l'évaluation et de la maitrise des risques dans le dossier de DUP Page 51 sur 56	Page 95

Détail de la recommandation émise par l'Ae	Numérotation	Emplacement de la recommandation dans l'avis de l'Ae	Réponse de l'Andra
De façon consolidée pour ce qui concerne la méthode d'analyse des risques, l'Ae recommande • de croiser des compétences et des expertises de natures et d'origines variées ; • de construire la démarche de maîtrise des risques en partant de la sécurité du projet dans sa finalité, à savoir le stockage après fermeture, en incluant plusieurs scénarios plausibles et contrastés de définition du gisement de déchets devant être stockés, d'en analyser les avantages et inconvénients en termes de durée de vie, d'environnement et de sécurité et de justifier le parti retenu ; • de se baser sur une double approche déterministe et probabiliste, à mettre en perspective de la durée de vie des installations et d'en tirer les conclusions quant à la classification des situations de fonctionnement de faibles probabilités ; • d'approfondir l'analyse du risque de ne pas pouvoir récupérer des colis.	R39	Chapitre 3.2 Maîtrise du risque sur le projet Cigéo Page 53 sur 56	Page 97
L'Ae recommande : • d'approfondir l'analyse des accidents pertinents pour les travaux et stockages souterrains de Cigéo, et en particulier analyser tous les incidents et accidents survenus au sein du laboratoire souterrain ; • de produire une tierce expertise de la modélisation de la dissipation du flux thermique issu des alvéoles HA, à l'échelle des alvéoles et de son environnement direct et de la couche dans son ensemble ; • de reprendre les études du potentiel géothermique du sous-sol et d'organiser leur pilotage par un groupe de géologues indépendants ; • d'inventorier les activités pouvant présenter des risques d'atteintes aux travaux et au stockage souterrain, dont celles de Cigéo, et si besoin, de définir des périmètres de protection autour de Cigéo où ces activités devront être réglementées ou interdites.	R40	Chapitre 3.2 Maîtrise du risque sur le projet Cigéo Page 55 sur 56	Page 100

1.3.3 Principes retenus pour le dossier soumis à enquête publique

1.3.3.1 Liste des pièces du dossier d'enquête publique préalable à la DUP mis à jour suite aux différentes recommandations

Au vu de l'avis de l'Ae, l'Andra a fait le choix, en cohérence avec les éléments de réponses aux différentes recommandations, de mettre à jour différentes pièces constituant le dossier d'enquête publique préalable principalement :

- l'étude d'impact associée au dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo (pièce 6 du dossier) ;
- le résumé non technique de l'étude d'impact (pièce 6bis du dossier) ;
- la pièce 12 avec la mise en compatibilité des documents d'urbanisme au vu des éléments de réponse de l'Andra sur les recommandations.

Le principe de traçabilité des mises à jour est explicité dans le chapitre 1.3.1.3.

1.3.3.2 Ajout de la synthèse des options de sureté

Dans son avis, l'Autorité environnementale souligne que le dossier de déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo fait simplement référence au dossier d'options de sûreté qui constitue une étape importante dans la préparation du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base du centre de stockage conformément à la réglementation (les options de sûreté sont soumises à l'Autorité de sûreté nucléaire - ASN conformément à l'article R. 593-14 du code de l'environnement).

Les éléments sur les incidences sur la santé humaine présentés dans l'étude d'impact associée au présent dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo font référence à ceux présentés très en détail dans le dossier « Cigéo 2015 » qui comprennent en particulier les deux pièces suivantes :

- les options de sûreté en exploitation (4) ;
- les options de sûreté après fermeture (5).

Ces deux rapports sont disponibles dans leur intégralité à l'adresse suivante : www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference.

L'Autorité environnementale considère également que « l'étude d'impact doit reprendre les éléments principaux de ce dossier afin d'être auto- portante et d'informer complètement le public ».

En réponse à cette demande et pour aider le public à prendre connaissance des documents existants sur le thème de la sureté du centre de stockage Cigéo, le dossier soumis à enquête publique est complété avec une synthèse des options de sûreté.

La synthèse constitue l'annexe 1 du présent mémoire en réponse à l'avis de l'Ae. Il pourra être fait référence à cette synthèse dans certaines réponses à des recommandations de l'Ae.

1.3.3.3 Traçabilité des mises à jour du dossier soumis à enquête publique

En lien avec une des recommandations de l'avis de l'Ae pour faciliter « *la clarté de l'information du public sur un dossier complexe (…)* » et au terme de l'instruction du dossier, l'Andra a pris la décision de mettre à jour de manière visible le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo déposé pour instruction par l'Andra le 3 août 2020 et ayant fait l'objet d'une diffusion volontaire par l'Andra en automne 2020.

Toutes ces mises à jour se matérialisent par un surlignage gris dans le corps du texte pour une meilleure lisibilité des précisions et compléments apportées.

Les corrections mineures de forme, d'orthographe et de mise en cohérence ne sont pas matérialisées dans le texte.

1.3.4 Rappel sur la terminologie employée dans le document

La terminologie employée dans le présent document est celle précisée dans le glossaire, pièce 15 du présent dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo. Sont repris ci-dessous la description du centre de stockage Cigéo et du projet global Cigéo.

1.3.4.1 Centre de stockage Cigéo

Le centre de stockage Cigéo, sous maitrise d'ouvrage Andra, comprend des installations en surface et en souterrain :

- une zone descenderie (ZD) en surface, principalement dédiée à la réception des colis de déchets radioactifs envoyés par les producteurs, à leur contrôle et à leur préparation pour le stockage avant transfert dans l'installation souterraine pour leur stockage ;
- une zone puits (ZP) en surface, dédiée aux installations de soutien aux activités réalisées dans l'installation souterraine et en particulier aux travaux de creusement ;
- une zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), comprenant des quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs, des zones de soutien logistique (ZSL) et leurs accès depuis la surface ;
- une liaison intersites (LIS) en surface, reliant la zone puits à la zone descenderie, comprenant un convoyeur, une voie dédiée à la circulation des poids lourds et une voie pour la circulation des véhicules légers ;
- une installation terminale embranchée (ITE) en surface, voie ferrée reliant la zone descenderie au réseau ferré national (RFN) à Gondrecourt-le-Château et incluant une plateforme logistique dans cette commune.

La figure 1-1 présente le schéma d'organisation de principe du centre de stockage Cigéo.

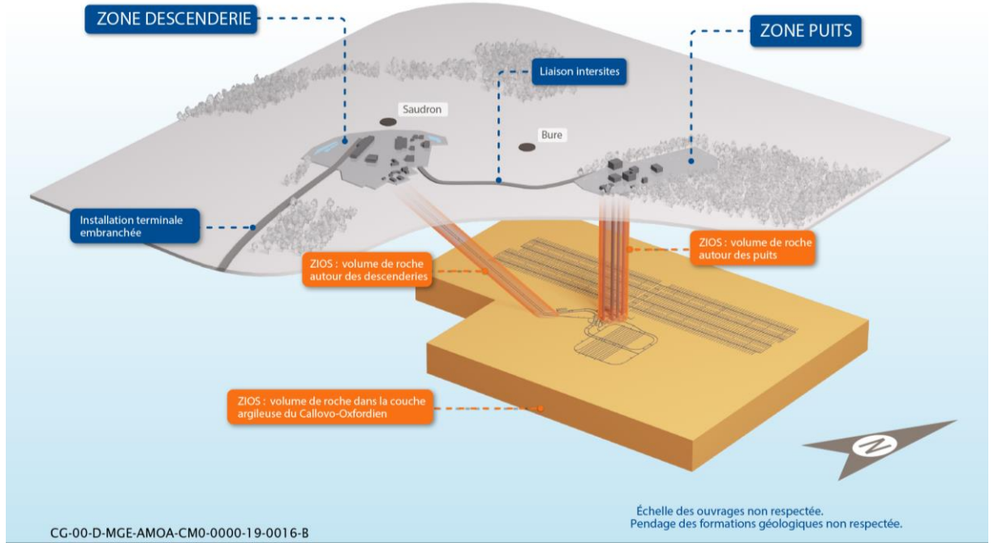


Figure 1-1 Schéma d'organisation de principe du centre de stockage Cigéo

La figure 1-2 présente la localisation des installations du centre de stockage Cigéo.

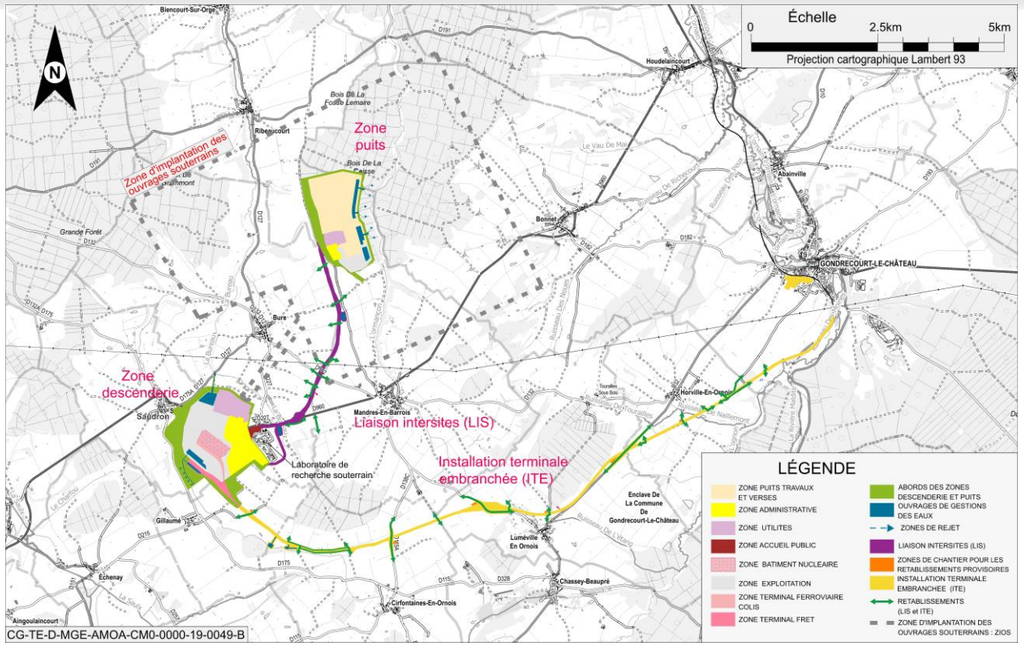


Figure 1-2 Localisation des installations du centre de stockage Cigéo

1.3.4.2 Le projet global Cigéo

Le projet global Cigéo comprend les opérations (installations, aménagements, constructions d'ouvrages et activités) nécessaires à la réalisation, au fonctionnement, au démantèlement, à la fermeture et à la surveillance du centre de stockage Cigéo. C'est l'ensemble de ces opérations qui constitue le périmètre de la présente étude d'impact. Il est couvert par la partie bleu marine de la figure 1-3. ci-après. Il comprend les opérations sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra, couvertes par les parties bleu ciel et grises et les opérations sous maîtrises d'ouvrages tierces couvertes par la partie verte. La partie bleu ciel couvre le centre de stockage Cigéo. La partie grise couvre des opérations effectuées par l'Andra à l'extérieur du futur centre de stockage pour la caractérisation et la surveillance environnementale.

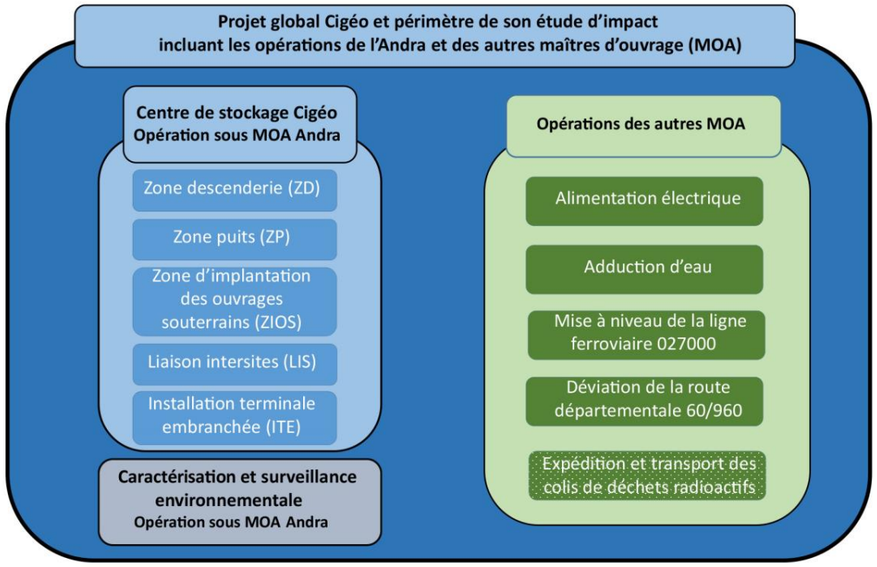


Figure 1-3 Projet global Cigéo et périmètre de son étude d'impact

Au niveau des opérations des autres maîtres d'ouvrage :

- l'alimentation électrique, cette opération est réalisée sous la maîtrise d'ouvrage de « Réseau de transport d'électricité » (RTE) ;
- l'adduction d'eau, cette opération est réalisée sous la maîtrise d'ouvrage des syndicats intercommunaux locaux d'alimentation en eau : SIVU[1] du Haut Ornain (Meuse) et le SIAEP[2] d'Échenay (Haute-Marne) ;
- la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000, cette opération est réalisée sous la maîtrise d'ouvrage de SNCF Réseau ;
- la déviation de la route départementale D60/960, cette opération est réalisée sous la maîtrise d'ouvrage du conseil départemental de la Haute-Marne ;
- l'expédition et transport des colis de déchets radioactifs, ces activités d'expédition et de transport des colis de déchets radioactifs depuis les sites des producteurs de déchets sont prévues depuis les installations existantes d'expédition d'EDF, Orano et du CEA) et par utilisation des infrastructures de transports existantes.

[1] Syndicat intercommunal à vocation unique.

[2] Syndicat intercommunal d'alimentation en eau potable.

2

Avis de l'Ae intégrant les réponses de l'Andra

Autorité environnementale

http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/l-autorite-environnementale-r145.html

Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le centre de stockage Cigéo (52-55)

n°Ae : 2020-79

Avis délibéré n° 2020-79 adopté lors de la séance du 13 janvier 2021

AUTHENTIFICATION GED
{A3146BD9-1B9E-43AC-8B28-3C8704E1D96}

Préambule relatif à l'élaboration de l'avis

L'Ae[1] s'est réunie le 13 janvier 2021 en visioconférence. L'ordre du jour comportait, notamment, l'avis sur le centre de stockage Cigéo (52-55).

Ont délibéré collégialement : Sylvie Banoun, Nathalie Bertrand, Barbara Bour-Desprez, Marc Clément, Pascal Douard, Christian Dubost, Sophie Fonquernie, Louis Hubert, Christine Jean, Philippe Ledenvic, François Letourneux, Serge Muller, Thérèse Perrin, Alby Schmitt, Éric Vindimian, Véronique Wormser

En application de l'article 4 du règlement intérieur de l'Ae, chacun des membres délibérants cités ci-dessus atteste qu'aucun intérêt particulier ou élément dans ses activités passées ou présentes n'est de nature à mettre en cause son impartialité dans le présent avis.

Étaient absents : Annie Viu

* *

L'Ae a été saisie pour avis par le directeur général de l'énergie et du climat, l'ensemble des pièces constitutives du dossier ayant été reçues le 16 octobre 2020.

Cette saisine étant conforme aux dispositions de l'article R. 122-6 du code de l'environnement relatif à l'Ae prévue à l'article L. 122-1 du même code, il en a été accusé réception. Conformément à l'article R. 122-7 du même code, l'avis doit être fourni dans un délai de trois mois.

Conformément aux dispositions de ce même article, l'Ae a consulté par courriers en date du 18 novembre 2020 :

- *le préfet de département de la Haute-Marne, qui a transmis une contribution en date du 24 décembre 2020,*
- *le préfet de département de la Meuse, qui a transmis une contribution en date du 23 décembre 2020,*
- *la directrice générale de l'Agence régionale de santé (ARS) de la région Grand-Est, qui a transmis une contribution en date du 11 janvier 2021.*

En outre, sur proposition des rapporteurs, l'Ae a consulté par courrier en date du 18 novembre 2020 :

- *la préfète de la région Grand-Est, qui a transmis une contribution en date du 11 janvier 2021 et la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la région Grand-Est qui a transmis une contribution en date du 15 décembre 2020,*
- *le président de l'autorité de sûreté nucléaire, qui a transmis une contribution en date du 14 décembre 2020,*
- *le directeur général de l''institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, qui a transmis une contribution en date du 8 janvier 2021.*

Sur le rapport de Alby Schmitt et Éric Vindimian, après en avoir délibéré, l'Ae rend l'avis qui suit.

Pour chaque projet soumis à évaluation environnementale, une autorité environnementale désignée par la réglementation doit donner son avis et le mettre à disposition du maître d'ouvrage, de l'autorité décisionnaire et du public.

Cet avis porte sur la qualité de l'étude d'impact présentée par le maître d'ouvrage et sur la prise en compte de l'environnement par le projet. Il vise à permettre d'améliorer sa conception, ainsi que l'information du public et sa participation à l'élaboration des décisions qui s'y rapportent. L'avis ne lui est ni favorable, ni défavorable et ne porte pas sur son opportunité.

La décision de l'autorité compétente qui autorise le pétitionnaire ou le maître d'ouvrage à réaliser le projet prend en considération cet avis. Une synthèse des consultations opérées est rendue publique avec la décision d'octroi ou de refus d'autorisation du projet (article L. 122-1-1 du code de l'environnement). En cas d'octroi, l'autorité décisionnaire communique à l'autorité environnementale le ou les bilans des suivis, lui permettant de vérifier le degré d'efficacité et la pérennité des prescriptions, mesures et caractéristiques (article R. 122-13 du code de l'environnement).

Conformément à l'article L. 122-1 V du code de l'environnement, le présent avis de l'autorité environnementale devra faire l'objet d'une réponse écrite de la part du maître d'ouvrage qui la mettra à disposition du public par voie électronique au plus tard au moment de l'ouverture de l'enquête publique prévue à l'article L. 123-2 ou de la participation du public par voie électronique prévue à l'article L. 123-19.

Le présent avis est publié sur le site de l'Ae. Il est intégré dans le dossier soumis à la consultation du public.

[1] Formation d'autorité environnementale du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD).

Synthèse de l'avis

Le dossier de déclaration d'utilité publique du projet de stockage souterrain de déchets nucléaires Cigéo, présenté par l'Agence nationale des déchets radioactifs, fait l'objet d'une évaluation environnementale sur un périmètre qui inclut, conformément aux dispositions du code de l'environnement, les opérations de différents maîtres d'ouvrage. Il s'agit d'un dossier d'une ampleur peu commune dont l'étude d'impact est déjà très importante. Cette première étude a vocation à être actualisée au fur et à mesure des demandes d'autorisation nécessaires à la réalisation du projet, notamment au moment de la création effective du centre.

Pour l'Ae, les principaux enjeux environnementaux du projet sont les suivants :

- la sécurité, après fermeture du site de stockage, pour une période de plusieurs dizaines de milliers d'années ;
- le risque de dissémination de la radioactivité dans l'environnement notamment aquatique ;
- la préservation de la santé humaine du fait du risque de dispersion chronique ou accidentelle de substances radioactives dans l'air, les sols ou les eaux et de leur absorption par inhalation ou ingestion ;
- la protection des milieux naturels et de la biodiversité.

Cet avis présente une première analyse de la prise en compte de l'environnement par le projet, en complément des nombreux expertises et avis fournis par d'autres organismes (ASN, IRSN notamment). Au stade d'une demande de déclaration d'utilité publique, l'Ae aborde principalement les enjeux environnementaux de court et moyen termes et évoque les questions à se poser par précaution pour le long terme. L'analyse des risques et des impacts, à long et très long termes, a vocation à être complétée et affinée à l'occasion des actualisations successives de l'étude d'impact, et particulièrement pour la demande d'autorisation de création de l'installation de stockage.

L'évaluation environnementale est très détaillée et prend soin d'expliciter de façon didactique les questions techniques abordées.

L'examen des solutions de substitution s'est appuyé sur une connaissance encore imparfaite de l'état initial, ce qui suggère que la prise en compte des enjeux environnementaux pourrait être meilleure. De façon générale, tant pour ce qui concerne le traitement des déchets, le type de stockage, le choix de la couche d'argilite, l'implantation exacte des installations du projet que pour l'avenir du territoire qui le porte, la prise en compte des enjeux environnementaux n'apparaît pas toujours suffisante. En particulier, les perspectives de développement économique et démographique territorial reposent sur une vision de court terme et n'envisagent pas suffisamment d'options pour maîtriser la vulnérabilité du territoire à long terme.

Le dossier ne présente pas de rapport de sécurité. Il est nécessaire de se référer à d'autres études et dossiers pour avoir une vision de la maîtrise des risques sur le site. L'enjeu majeur de sécurité justifierait pourtant la production d'une étude formalisée dans le contexte d'une demande d'utilité publique. L'étude d'impact n'aborde pas les situations accidentelles ou ne le fait que ponctuellement pour ce qui concerne les eaux ; l'Ae recommande de la compléter sur ce point.

L'Ae recommande de présenter, dès le dépôt de la demande de déclaration d'utilité publique, un programme détaillé d'études complémentaires de maîtrise des risques et de surveillance, ainsi que d'indiquer les conclusions à atteindre, correspondant aux décisions à prendre à chacune des étapes. D'autres incertitudes quant aux incidences sur les sites Natura 2000 et aux impacts sur les milieux aquatiques doivent également être levées.

L'ensemble des observations et recommandations de l'Ae est présenté dans l'avis détaillé.

Sommaire

1 Contexte, présentation du projet et enjeux environnementaux 5
1.1 Contexte et périmètre du projet 5
1.2 Présentation du projet et des aménagements projetés 8
1.2.1 La zone descenderie 9
1.2.2 La zone puits 9
1.2.3 Les installations souterraines 10
1.2.4 Liaison inter-sites 11
1.2.5 Installation ferroviaire terminale embranchée (ITE) et plateforme logistique ferroviaire 11
1.2.6 Ligne électrique à 400 kV 11
1.2.7 Enchaînement des opérations 11
1.2.8 Coût du projet 13
1.3 Procédures relatives au projet 13
1.4 Principaux enjeux environnementaux du projet relevés par l'Ae 14

2 Analyse de l'étude d'impact 14
2.1 État initial 14
2.1.1 Milieux naturels et physique 14
2.1.2 Milieu humain 25
2.2 Analyse de la recherche de variantes et du choix du parti retenu 27
2.2.1 Opportunité d'engager dès à présent le projet Cigéo 28
2.2.2 Choix du mode de gestion des déchets 28
2.2.3 Les différents types de stockage profond 29
2.2.4 Les couches géologiques utilisables 29
2.2.5 Nature et choix des déchets à entreposer 30
2.2.6 Choix d'implantation des installations 31
2.2.7 Les options de développement du territoire 32
2.3 Analyse des incidences du projet et des mesures d'évitement, de réduction et de compensation 33
2.3.1 Milieux naturels et physique 33
2.3.2 Milieu humain 44
2.4 Évaluation des incidences Natura 2000 47
2.5 Évaluation économique et sociale des infrastructures de transport 48
2.6 Suivi du projet, de ses incidences, des mesures et de leurs effets 49
2.7 Résumé non technique 49

3 Maîtrise des risques majeurs 50
3.1 Traitement de l'évaluation et de la maîtrise des risques dans le dossier de DUP 50
3.2 Maîtrise du risque sur le projet Cigéo 51

4 Mise en compatibilité des documents de planification 55

Avis détaillé

Le projet Cigéo a pour objectif le stockage[2] souterrain des déchets nucléaires de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) produits par les activités nucléaires en France. Il Le dossier est volumineux et complexe. L'Ae souligne l'effort de didactisme de l'Agence nationale des déchets radioactifs (Andra), maître d'ouvrage principal du projet. Le présent avis reflète une situation à un moment encore préliminaire de l'avancement du projet.

1 Contexte, présentation du projet et enjeux environnementaux

1.1 Contexte et périmètre du projet

Cigéo est un projet porté par l'Andra, chargée de la gestion des centres de stockage de ce type de déchets par l'article L. 542-12 du code de l'environnement. Les différentes catégories de déchets nucléaires couverts par le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) sont représentées sur la figure 1.

Figure 1 : Typologie et devenir des déchets nucléaires adoptée en France. Source : dossier.

La loi, et sa déclinaison dans le PNGMDR, a décidé que le stockage géologique profond est la solution incontournable de gestion définitive des déchets HA et MA-VL. Les déchets à stocker dans ce cadre sont les déchets HA et MA-VL recensés dans les inventaires définis dans le code de l'environnement :

- l'inventaire de « référence » comprend environ 10 000 m³ de déchets conditionnés HA et 73 000 m³ de déchets conditionnés MA-VL. Il correspond à un scénario de poursuite de la production électronucléaire avec une durée de fonctionnement des installations existantes de 50 années et de retraitement de la totalité des combustibles usés produits. Les déchets provenant des les installations en cours de construction, notamment l'EPR de Flamanville, le réacteur Jules Horowitz[3] et l'installation Iter[4], sont également pris en compte. Les déchets produits par un éventuel futur parc de centrales nucléaires nouvelles ne sont pas pris en compte, ni les déchets de démantèlement des installations de retraitement de combustibles actuels ;
- l'« inventaire de réserve » vise à permettre la prise en compte d'évolutions de stratégie des industriels ou de politique énergétique, ainsi que les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion des déchets. Les déchets destinés au stockage FA-VL n'y sont inclus qu'au titre de la gestion des incertitudes et resteraient préférentiellement destinés à la filière FA-VL, stockés à faible profondeur, toujours à l'étude et sans site identifié.

Conformément à l'article D. 542-90 du code de l'environnement, Cigéo retient l'inventaire de référence comme base de conception. Les déchets qui devront réellement être stockés à Cigéo ne seront connus avec précision qu'au fur et à mesure de leur production, ainsi que de la mise en place des filières de gestion adaptées aux déchets autres que HA-VQ et VL et MA-VL. Pour en tenir compte, l'ensemble des substances figurant dans l'inventaire de réserve doivent pouvoir être accueillies si besoin dans le centre de stockage, sous réserve le cas échéant d'évolutions dans sa conception. À cet égard, l'Andra mène des études d'adaptabilité de Cigéo à l'ensemble de ces déchets. Ces études seront présentées dans le dossier de demande d'autorisation de création. Elles ne sont pas dans le présent dossier de demande de déclaration d'utilité publique (DUP). Les évolutions de conception nécessaires à l'accueil de ces substances devront faire l'objet de procédures d'autorisation, comme par exemple le stockage de combustibles usés si le statut des stocks d'uranium appauvri devait changer, actuellement considérés comme des matières valorisables, la question étant actuellement soulevée de les considérer comme des déchets.

En France, les déchets HA représentent 0,2 % du volume total des déchets nucléaires mais leur activité est équivalente à 94 % de la radioactivité de tous les déchets nucléaires. Les déchets MA-VL comptent pour 2,9 % du volume et 4 % de la radioactivité. Les volumes actuels en France sont de 3 900 m³ de déchets HA et 45 000 m³ de déchets MA-VL. Actuellement entreposés dans différentes installations, ils représentent déjà 40 % (HA) et 60 % (MA-VL) des volumes qui ont vocation à être stockés par Cigéo.

Les déchets qui seront stockés dans le centre Cigéo sont les plus dangereux[5] : une personne qui s'approcherait de déchets HA aurait une espérance de vie de quelques minutes. Ce sont également ceux dont la radioactivité diminue le plus lentement. La nature exacte de tous les déchets qui seront stockés n'est pas encore connue avec précision du fait des déchets de l'inventaire de réserve ». L'avis de l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) de 2017[6], émis préalablement à l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)[7] sur le dossier d'options de sûreté, signale « *que le*

[2] Le stockage ne doit pas être confondu avec l'entreposage qui consiste à conserver les déchets radioactifs sur des sites sécurisés, ce qui permet notamment d'attendre que leur radioactivité décroisse naturellement. Un stockage diffère d'un entreposage par sa nature potentiellement pérenne.

[3] Le réacteur de recherche Jules Horowitz est un projet de réacteur nucléaire de recherche porté par le CEA et construit sur le centre de Cadarache, consacré principalement à la recherche sur les matériaux et les combustibles pour l'industrie électronucléaire et la médecine nucléaire.

[4] Le réacteur thermonucléaire expérimental international, en abrégé Iter (de l'anglais *international thermonuclear experimental reactor*), est un projet international de réacteur nucléaire de recherche civil à fusion nucléaire de type tokamak, situé à proximité du centre d'études nucléaires de Cadarache à Saint-Paul-lez-Durance.

[5] HA : plusieurs milliards de becquerels par gramme (Bq/g), MA-VL entre un million et un milliard de Bq/g.

[6] Avis/IRSN N°2017-00190 : Avis relatif au dossier « Projet Cigéo –Dossier d'Options de Sûreté »

[7] L'ASN est devenue une autorité administrative indépendant avec la Loi « Transparence et sûreté nucléaire du 13 juin 2006. Elle était constituée précédemment de la DGSNR (Direction générale de la sureté nucléaire et de la radioprotection et des DRIRE, directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement

stockage de déchets dits «en réserve» ou de combustibles usés ne saurait être autorisé sans une démonstration de sûreté[8] complète prenant en compte une telle évolution de l'inventaire ».

Pour la complète information du public, mais aussi pour la quantification du risque dans la durée, il serait utile de présenter l'évolution de la dangerosité du stockage souterrain, par exemple par un indicateur de type « activité globale » et son évolution dans le temps, depuis sa création, jusqu'au moment où sa dangerosité pourra être considérée comme négligeable.

Les déchets HA dégagent de la chaleur, sauf cas particulier des déchets dits HA0. Celle-ci doit être évacuée afin que la température des colis de déchets ne s'accroisse pas au-delà d'une valeur mettant en danger le stockage lui-même. L'énergie en jeu atteint une puissance de plusieurs centaines de kW par colis HA. Ces déchets seront donc, dans un premier temps, entreposés en surface, comme actuellement, pendant plus d'un siècle dans des installations appartenant aux exploitants nucléaires[9]. Le dossier indique que les déchets HA actuels et futurs pourront être, après entreposage, stockés définitivement, en profondeur. Ce stockage pourra commencer à partir des années 2070-80, moment où les premiers déchets entreposés auront suffisamment refroidi. Les déchets HA0 et MA-VL ne présentent pas ces caractéristiques et pourraient être stockés immédiatement.

L'objectif affiché de ce projet est le stockage profond des déchets *« afin de limiter les charges supportées par les générations futures »*. Pour cela, il est prévu de faire fonctionner le centre pendant un siècle au cours duquel les déchets seront stockés et le site souterrain agrandi, étant entendu que, conformément à la loi, le stockage devra être réversible. Cette réversibilité permettra dans l'avenir, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives de stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. Elle se traduit concrètement par la possibilité de récupérer les colis stockés qui doit être garantie pour au moins cent ans.

La loi prévoit que la demande d'autorisation de création concerne une couche géologique ayant fait l'objet d'études au moyen d'un laboratoire souterrain, que cette demande est précédée d'un débat public, d'un avis de l'ASN et d'une évaluation de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. L'enchaînement des étapes du projet est également très encadré. Le projet doit faire l'objet d'une phase industrielle pilote de stockage, préalable au vote d'une loi décidant de sa poursuite.

Le projet d'étude d'impact a fait l'objet d'un cadrage préalable de l'Ae[10] en 2013. Ce cadrage avait été réalisé dans la perspective du dépôt d'une demande d'autorisation de création en 2015 qui n'a pas encore été déposée. Le présent avis répond à une saisine sur un dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo. Il se situe en amont de la demande d'autorisation de création et devrait déboucher sur une phase d'aménagements préalables à réaliser.

[8] La sûreté nucléaire est un terme définissant l'ensemble des activités ayant trait au maintien de l'intégrité des mécanismes, processus, outils ou instruments contenant de la matière radioactive, permettant de garantir l'absence d'effets dommageables sur les individus et l'environnement. Il convient de distinguer explicitement la sûreté nucléaire de la sécurité nucléaire qui définit l'ensemble des mesures (actives ou passives) relatives à la protection des matières nucléaires, de leurs installations et de leur transport contre des actes malveillants (internes ou externes), permettant de garantir l'absence de conséquence inacceptable pour les populations et l'environnement.

[9] Or ces installations ont une durée de vie limitée à environ un siècle du fait du vieillissement des matériaux qui les constituent comme le béton et les aciers.

[10] Avis Ae 2013-62 concernant le cadrage préalable du projet Cigéo

Le cadrage préalable s'était penché, à la demande de l'Andra, sur la question du périmètre du projet. L'Ae avait proposé une vision très large du « programme de travaux » Cigéo. La législation actuelle substitue une notion élargie de projet à celle de programme de travaux. Cependant, l'interprétation initiale de l'Ae et son attente d'une analyse des impacts de l'ensemble du programme restent importantes pour la complète information du public. En particulier, le dossier soumis à l'Ae ne comporte pas d'éléments sur les impacts, ni sur la sûreté de la chaîne de conditionnement et de transport des déchets depuis les sites des producteurs jusqu'à leur prise en charge au niveau de l'installation terminale embranchée. Les déchets qui seront stockés dans Cigéo ne pourront l'être qu'après avoir effectué ces travaux préliminaires que la note de la Commission européenne ENV.A/SA/sb Ares(2011)33433 du 25 mars 2011 interprétative de la directive 85/337/EEC modifiée qualifie de travaux associés[11].

L'Ae recommande d'inclure, dans l'analyse des impacts et des mesures environnementales, les activités de traitement, de conditionnement et de transport des déchets depuis les sites des producteurs.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R1

L'Andra prend acte de cette recommandation et indique en synthèse :

- **que les activités de traitement et de conditionnement des déchets sont réalisées indépendamment de l'existence même du centre de stockage Cigéo, elles en sont donc indépendantes et par conséquent exclues du périmètre du projet global Cigéo analysé ;**
- **que les activités d'expédition et de transport de colis de déchets radioactifs depuis les sites des producteurs jusqu'au centre de stockage Cigéo sont liées au projet global Cigéo et sont donc intégrées dans l'analyse des impacts et des mesures environnementales du projet global Cigéo. Le périmètre étudié propose ainsi une analyse globale des enjeux du projet.**

Rappel relatif aux lieux d'origine des déchets destinés à Cigéo

Les cinq sites dont sont issus les colis de déchets destinés au centre de stockage Cigéo sont les suivants :

- les installations Orano du site de La Hague dans le département de la Manche dont la principale vocation est le traitement des combustibles nucléaires usés ;
- l'installation EDF ICEDA (Installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activés) située sur le site de la centrale nucléaire de Bugey dans le département de l'Ain ;
- les installations du CEA du centre de Marcoule dans le département du Gard ;
- les installations du CEA du centre de Cadarache dans le département des Bouches-du-Rhône, utilisées depuis de nombreuses années pour les activités de recherche en soutien au programme électronucléaire français ;
- les installations CEA du centre de Valduc dans le département de la Côte d'Or, menant des activités liées à la force de dissuasion.

Figure 2-1 *Carte de localisation des sites d'expédition des colis de déchets radioactifs vers le centre de stockage Cigéo*

Pour assurer un bon niveau d'information du public sur ces installations existantes des producteurs de déchets (présentées pièce 6 étude d'impact, volume II § 4.4.5), des précisions sont apportées dans le tableau 2-1 présenté en fin de réponse qui renvoie aux rapports annuels des producteurs pour l'année 2019[3].

Comme indiqué dans les paragraphes de l'étude d'impact (Pièce 6 – Vol IV § 10.1 et Vol II § 2) relatifs aux déchets radioactifs actuellement entreposés sur les sites des producteurs, le stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs HA et MA-VL est un mode de gestion durable qui permet d'assurer, après fermeture, leur mise en sécurité définitive. La réalisation du centre de stockage Cigéo a donc un effet positif à long terme à l'échelle du territoire national.

La démarche retenue par l'Andra pour délimiter le projet global objet de l'étude d'impact

Pour déterminer le périmètre du projet global Cigéo, objet de l'étude d'impact, l'Andra a tenu compte à la fois :

- de la définition de la notion de projet explicitée au I et III de l'article L. 122-1 du code de l'environnement[4] ;
- de la note d'interprétation de la directive 85/337/EEC, remplacée par la directive 2011/92/UE, d'évaluation des incidences relatives à certains projets sur l'environnement (6), note citée par l'Autorité environnementale dans son avis.

L'Andra a pris en considération l'ensemble du projet Cigéo, c'est-à-dire le centre de stockage lui-même (le « projet central »), plus les « travaux associés ou accessoires » (opérations de raccordement). Elle a ensuite réalisé un test de « centre de gravité » pour déterminer si des travaux associés ou accessoires devaient être intégrés ou non dans le « projet central ».

Ainsi, parmi les activités qui sont citées dans la recommandation de l'Ae, il convient de distinguer :

1. **Les activités de traitement et de conditionnement des déchets.**

   Elles correspondent à l'ensemble des opérations réalisées en vue de produire un colis de déchets radioactifs à partir de déchets bruts. Ces activités sont réalisées sur les sites des producteurs et sous leur responsabilité. Elles comprennent aussi l'entreposage des déchets et des colis sur ces sites. Ces opérations peuvent notamment consister en l'introduction dans un conteneur, l'immobilisation, le traitement physico-chimique ou l'enrobage de déchets radioactifs.(7). Ces activités sont déjà autorisées et déjà effectuées dans les installations nucléaires des producteurs de déchets radioactifs, indépendamment du projet de centre de stockage Cigéo. Leurs incidences sont évaluées dans les études d'impact de ces installations nucléaires (INB). **Ces activités sont réalisées indépendamment de l'existence même du centre de stockage Cigéo, elles en sont donc indépendantes et par conséquent exclues du périmètre du projet global Cigéo.**

2. **Les activités d'expédition et de transport de colis de déchets jusqu'au centre de stockage Cigéo.**

   Ces activités sont également sous la responsabilité des producteurs de déchets. En préalable à l'expédition et au transport des colis de déchets, les producteurs sollicitent l'approbation de l'Andra. Les producteurs de déchets transmettent un dossier justificatif que l'Andra instruit pour vérifier la conformité des colis aux spécifications d'acceptation des colis sur le centre de stockage Cigéo. L'ensemble de ce processus est contrôlé par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). L'Andra ne donne son feu vert aux expéditions que pour des colis dont il a été démontré qu'ils respectent les spécifications d'acceptation et pour lesquels elle dispose de capacités de stockage (place disponible dans des alvéoles de stockage opérationnels). **Les activités d'expédition et de transport de colis de déchets radioactifs jusqu'au centre de stockage Cigéo sont liées au projet global Cigéo et sont donc intégrées à son périmètre**.

   L'étude d'impact du projet global Cigéo du présent dossier d'enquête publique préalable à la DUP comprend l'opération « activités d'expédition et de transport » comme l'indique la présentation du périmètre du projet global, précisée dès le chapitre 1 du volume I (Introduction et contexte réglementaire) de l'étude d'impact.

[3] Ces rapports présentent notamment les dispositions prises en matière de protection des intérêts visés par l'article L. 593-1 du code de l'environnement (sécurité, santé et salubrité publiques, protection de la nature et de l'environnement), les incidents et accidents, la nature et les résultats des mesures des rejets et la nature et la quantité de déchets radioactifs entreposés. Ces installations feront l'objet d'études d'impact actualisées en cas de modification notable.

[4] « *I. - Pour l'application de la présente section, on entend par : 1° Projet : la réalisation de travaux de construction, d'installations ou d'ouvrages, ou d'autres interventions dans le milieu naturel ou le paysage, y compris celles destinées à l'exploitation des ressources du sol ; […] III.- […] Lorsqu'un projet est constitué de plusieurs travaux, installations, ouvrages ou autres interventions dans le milieu naturel ou le paysage,* ***il doit être appréhendé dans son ensemble, y compris en cas de fractionnement dans le temps et dans l'espace et en cas de multiplicité de maîtres d'ouvrage, afin que ses incidences sur l'environnement soient évaluées dans leur globalité***. »

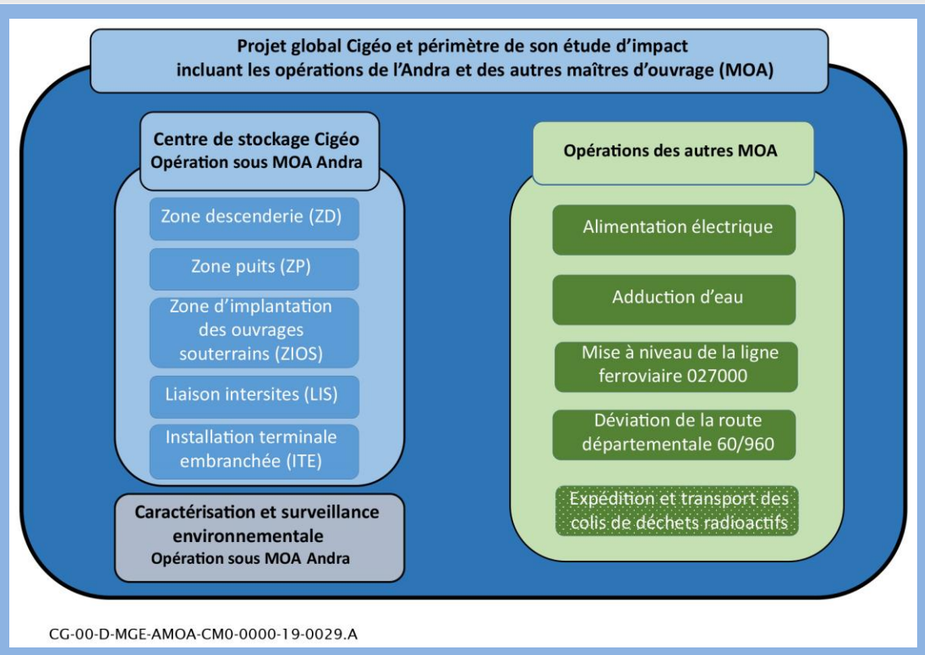


Figure 2-2 Projet global Cigéo et périmètre de son étude d'impact

Les impacts des expéditions et des transports de colis de déchets radioactifs, les incidences susceptibles de résulter de la vulnérabilité de ces activités (« *depuis les sites des producteurs jusqu'à leur prise en charge au niveau de l'installation terminale embranchée* ») aux risques d'accidents majeurs et aux catastrophes ont été présentés à différents endroits de l'étude d'impact, dont le volume IV, chapitre 17.2.1.1 et 17.2.1.3 et ceux rappelés ci-après.

Les colis de déchets radioactifs sont expédiés depuis les sites de producteurs et transportés sur la voie publique dans des emballages de transport adaptés aux types de colis de déchets transportés. Ces emballages sont conçus conformément à la réglementation en matière de transport des substances radioactives (ADR (8)). Ils sont conçus pour assurer la protection radiologique, évacuer la chaleur résiduelle et résister à des agressions possibles (choc, chute, incendie à proximité…) lors des trajets et des manutentions (Pièce 6 – Vol II § 4.4.5.1). Pour obtenir leur agrément de transport sur la voie publique, les emballages de transport sont soumis à des essais très sévères. Les activités d'expédition et de transport sont autorisées et contrôlées par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Des modalités particulières d'organisation de ces transports impliquent les services d'intervention de l'État sur les territoires traversés afin de garantir une réponse rapide et adaptée en situation anormale (immobilisation du convoi, accident, acte de malveillance) (Pièce 6 – Vol IV § 17.2).

Compte tenu des exigences de la réglementation en matière de protection des transports des colis de déchets radioactifs, du nombre réduit de convois transportant des colis radioactifs vers Cigéo[5] (Pièce 6 – Vol II § 4.4.5), des caractéristiques des emballages de transport en termes de robustesse aux accidents et des dispositions d'organisation et de suivi des convois, l'incidence des activités d'expédition et de transport sur la voie publique des colis de déchets radioactifs vers Cigéo n'est pas notable.

Cette incidence est évaluée dans l'étude d'impact du projet global Cigéo aux paragraphes d'analyse des incidences relatifs à la qualité de l'air (Pièce 6 – Vol IV § 2.4.4.3), à la pollution des sols (Pièce 6 – Vol IV §3.5.2.6), aux incidences sur les infrastructures de transport (Pièce 6 – Vol IV § 12.1 et 12.2), aux incidences acoustiques et vibratoires (Pièce 6 – Vol IV § 13.2 et 13.3), aux incidences négatives notables sur l'environnement des risques d'accidents et de catastrophes majeurs (Pièce 6 – vol IV § 17-2).

Dans le volume VI dédié aux incidences sur la santé humaine, il est rappelé que l'exposition radiologique induite par les convois de transport sont très peu fréquents et limités dans le temps, est extrêmement faible (Pièce 6 – Vol VI § 3.3.3.1. En effet ces convois présentent des protections radiologiques efficaces et ne contiennent qu'un nombre limité de colis de déchets radioactifs.

Par la définition d'un projet global intégrant les activités d'expédition et de transport, et grâce à une étude d'impact évaluant les effets de ces activités et exposant leurs éventuelles incidences négatives notables sur l'environnement liés à des risques d'accidents ou de catastrophes majeurs, l'Andra répond ainsi à l'objectif de la directive n° 2011/92/UE et du code de l'environnement d'évaluer les incidences du projet dans leur ensemble.

[5] Les orientations actuellement envisagées par les producteurs pour le transport des colis déchets radioactifs sont présentées dans le volume II de l'étude d'impact (Pièce 6 – Vol II § 4.4.5). Au démarrage du fonctionnement du centre de stockage Cigéo, les flux de convois acheminés par voie ferroviaire sont estimés à environ huit trains par an. Ensuite, le flux s'intensifierait progressivement pour atteindre, une moyenne maximale d'environ six trains par mois. Une centaine de camions, sur toute la durée de fonctionnement de Cigéo serait par ailleurs nécessaire pour l'acheminement par route des colis de déchets depuis le centre de Valduc, non embranché au réseau ferré national et situé à environ 150 km par la route du centre de stockage Cigéo.
À titre indicatif, actuellement (source irsn.fr), près d'un million de colis de substances radioactives sont transportés par an en France (représentant quelques % du total des matières dangereuses transportées). Environ 10 % des colis de substances radioactives transportés en France sont en lien avec l'industrie électronucléaire. Cela représente de l'ordre de 20 000 transports annuels, pour plus de 100 000 colis de substances radioactives.

Tableau 2-1 Liens internet présentant des informations sur les installations des sites des producteurs

Installations des producteurs	Informations générales	Rapport Transparence et Sécurité Nucléaire
Orano – La Hague	https://www.orano.group/fr https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/tour-des-implantations/recyclage-du-combustible-use/la-hague	https://www.orano.group/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/rapport-tsn-la-hague-2019.pdf?sfvrsn=662c3ab5_8
EDF – Bugey de l'opération « ICEDA	https://www.edf.fr/centrale-nucleaire-bugey https://www.ain.fr/content/uploads/2020/12/document-presentation-commission-locale-information-cli-centrale-nucleaire-bugey-cnpe-reunion-publique-7-decembre-2020.pdf (slides 41 à 61 en particulier) https://www.edf.fr/centrale-nucleaire-bugey/iceda	https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-bugey/surete-et-environnement/20200619_bugey-rapporttsn-2019.pdf
CEA - Cadarache	https://cadarache.cea.fr/cad	https://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/institutionnel/transparence-securite-nucleaire/rapport-tsn-2019-cea-cadarache.aspx
CEA - Marcoule	https://www.cea.fr/marcoule	https://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/institutionnel/transparence-securite-nucleaire/rapport-tsn-2019-cea-marcoule.aspx
CEA - Valduc	http://www-dam.cea.fr/	Cette installation n'est pas une installation civile (INB). Elle n'est pas soumise aux exigences d'information du public des articles L 125-12 à L. 125-16-1 du code de l'environnement en matière de transparence et de sûreté nucléaire

La déclaration d'utilité publique a pour but, selon le dossier, d'assurer la maîtrise foncière sur une surface de 665 ha au cas où les procédures d'acquisitions à l'amiable n'aboutiraient pas, de réaliser la mise en conformité des documents d'urbanisme et de « *légitimer politiquement* » les opérations concourant à la réalisation du projet Cigéo.

L'Andra précise que l'étude d'impact présentée sera actualisée au fur et à mesure des demandes d'autorisation en prenant notamment en compte leurs impératifs spécifiques. L'Ae confirme que cette vision est la seule appropriée pour assurer l'information du public et du législateur sur les enjeux environnementaux tout au long du projet. Cette actualisation motivera des saisines successives de l'Ae. Il conviendra que les modifications soient datées et tracées et leurs raisons explicitées.

L'Ae recommande, pour la clarté de l'information du public sur un dossier complexe dont les enjeux sont importants, que les modifications ultérieures apportées à l'étude d'impact dans le cadre de ses futures actualisations soient tracées de manière claire.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R2

L'Andra prend acte de cette recommandation pour la bonne information du public et s'engage à apporter une traçabilité complète des modifications apportées au présent dossier et aux études d'impact ultérieures.

Le centre de stockage Cigéo faisant l'objet de la présente étude d'impact est défini au stade d'études de niveau « avant-projet » qui est la phase de définition d'un projet permettant d'en préciser le cadre général, à un niveau suffisant pour en évaluer les incidences potentielles mais permettant de continuer à intégrer, dans la conception de celui-ci, les prescriptions et recommandations issues de la participation avec le public et des échanges avec les administrations compétentes.

Le projet global Cigéo sera effectivement, après la présente procédure d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique (DUP), soumis à plusieurs autres procédures de décisions/autorisations administratives, demandées par l'Andra ou les autres maîtres d'ouvrages. Ces procédures donneront lieu à d'autres étapes de participation du public au cours desquelles des versions actualisées de l'étude d'impact seront soumises au public.

Afin de garantir la clarté de l'information du public sur ce dossier complexe au fur et à mesure de ces actualisations, l'Andra assurera la traçabilité des précisions et compléments apportés à la version actualisée (N+1) par rapport à la version (N) de l'étude d'impact du projet global Cigéo à la fois :

- dans le texte, par un code couleur, pour les précisions apportées par l'avancement de la conception du projet ou la prise en compte du résultat des phases de participation du public ;
- par un tableau de suivi des évolutions de l'étude d'impact.

Un historique des procédures rappellera la date d'édition de chacune des versions actualisées de l'étude d'impact.

En complément, l'Andra s'engage également à assurer la traçabilité des mises à jour entre la version d'un dossier réglementaire lors de son dépôt pour instruction et la version du même dossier soumis à enquête publique (cf. 1.3.3.3 du présent document). .

1.2 Présentation du projet et des aménagements projetés

Le centre de stockage sera composé des installations présentées sur la figure 2 ci-après.

Les colis de déchets seront acheminés à la descenderie (ZD), à l'ouest du site, à cheval sur les départements de la Haute-Marne et de la Meuse, par une voie ferrée spécifique dite installation terminale embranchée (ITE) reliée au réseau ferré national sur la commune de Gondrecourt-le-Château. Ils seront alors contrôlés et préparés pour être acheminés par funiculaire vers le centre de stockage situé au sein de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) de 29 km². Cette zone comporte une zone puits (ZP) permettant d'accéder aux espaces souterrains de stockage et de poursuivre le creusement de cavités. Une liaison intersites en surface (LIS) permet les circulations et transports de marchandises entre ces deux sites par voie routière et au moyen d'un transporteur à bande enterré.

[11] Cette note préconise, pour déterminer si de tels travaux associés doivent être considérés comme partie intégrante de l'intervention principale au regard de l'évaluation environnementale, un test de vérification et d'évaluation dit « du centre de gravité »: « *Ce test du centre de gravité devrait vérifier si ces travaux associés sont centraux ou périphériques par rapport aux travaux principaux et dans quelle mesure ils sont susceptibles de prédéterminer les conclusions de l'évaluation des impacts environnementaux* ».

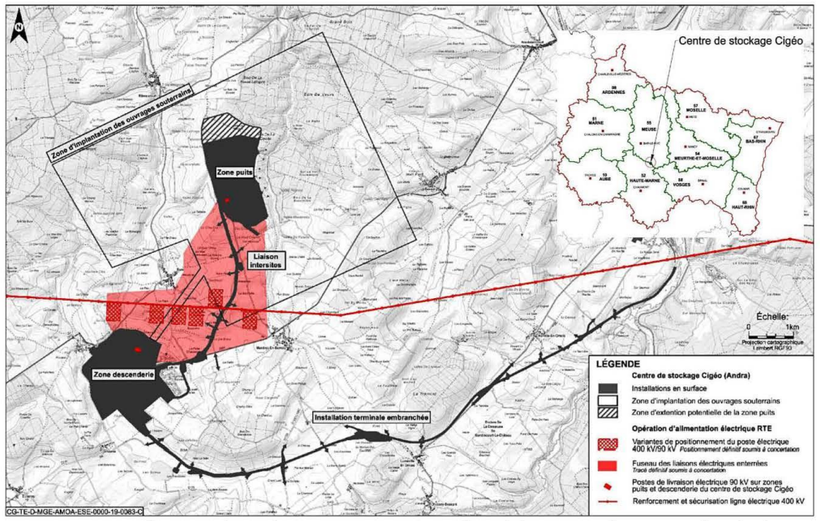


Figure 2 : Carte du site et de ses diverses composantes, en haut à droite carte de situation dans la région Grand-Est. Source : dossier.

1.2.1 La zone descenderie

La surface de la zone descenderie est de 296 ha. Son emprise est située à l'ouest du laboratoire souterrain de l'Andra, dans la Meuse sur la commune de Bure et dans la Haute-Marne sur les communes de Gillaumé et Saudron.

Deux bâtiments nucléaires sont envisagés : le premier, de 32 000 m², accueillera et conditionnera les colis de déchets de haute activité dégageant peu de chaleur et le second, de 20 000 m², les colis dégageant de la chaleur. Ce second bâtiment est prévu pour une mise en service entre 2070 et 2080. Ils sont équipés d'unités de filtration de très haute efficacité et d'une cheminée de 40 m de hauteur. Ils sont reliés par une galerie de 100 m de longueur à la tête de la descenderie des colis. Celle-ci, d'une surface au sol de 7 000 m², est reliée par funiculaire au stockage souterrain. Toutes les opérations de manipulation des déchets seront automatisées et vidéo surveillées.

L'ensemble est clôturé. Les bâtiments sont ceinturés par une paroi enterrée d'une profondeur de 18 mètres. Les eaux usées, de ruissellement et d'exhaure sont traitées en stations. Les capacités de stockage sont de l'ordre de 120 000 m3.

1.2.2 La zone puits

La surface de la zone puits est de 202 ha sur les communes de Mandres-en-Barrois et Bonnet dans la Meuse. Sa vocation est de permettre les activités souterraines de déploiement progressif des zones de stockage. Elle ne comporte pas d'activités nucléaires. Plusieurs puits seront creusés dans la couche d'argilite[12] selon deux zones : zone de travaux et zone d'exploitation, équipées d'usines

[12] L'argilite est une forme de roche sédimentaire argileuse indurée à grain fin et très peu perméable. Source Wikipedia.

de ventilation. Au nord de la zone puits, trois espaces successifs notés Z1 à Z3 sont prévus pour déposer les verses[13]. Les matériaux extraits sont de deux natures : les verses vives, stockées sur Z1 qui pourront servir à refermer le stockage dans un siècle à un siècle et demi et les verses mortes, stockées sur Z2 dont les possibilités de valorisation font l'objet de travaux en cours. L'ensemble représente 11 000 000 m³ d'argilite dont 40 % de verses vives déposées sur une hauteur de 20 m et végétalisées en surface. Dans l'hypothèse où les verses mortes ne seraient pas valorisables, 39 ha supplémentaires seront mobilisés.

Les eaux de ruissellement sur les verses non encore végétalisées seront collectées et stockées dans un bassin dit qualitatif de 10 000 m³ et un bassin quantitatif de 47 à 64 000 m³ afin de rejeter dans l'Ormançon un débit régulé respectant les critères du bon état des eaux au sens de la directive cadre sur l'eau. Les eaux de ruissellement sur les surfaces imperméabilisées seront collectées dans deux bassins de 10 000 m³. Les eaux usées et industrielles sont traitées dans une station d'épuration raccordée à un bassin de décantation de 1 300 m³.

1.2.3 Les installations souterraines

Les ouvrages souterrains seront déployés au fur et à mesure de l'exploitation du stockage. Ils seront situés à 500 m sous la surface au sein de la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien. Les communes surplombant le stockage souterrain sont toutes situées dans le département de la Meuse : Mandres-en-Barrois, Bonnet, Bure, Ribeaucourt, Houdelaincourt et Saint-Joire.

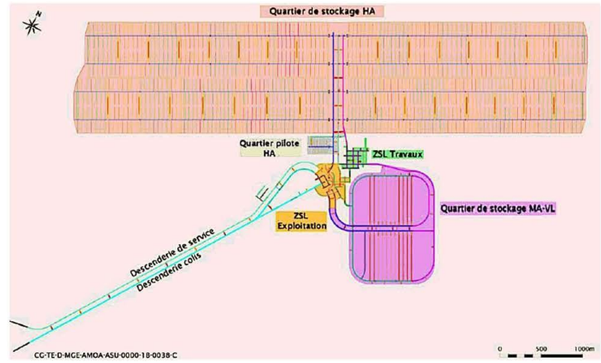


Figure 3 : Organisation des installations en sous-sol pour le stockage des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL). Source : dossier.

Les installations souterraines comportent les éléments présentés sur la figure 3, notamment deux descenderies parallèles d'environ 4 kilomètres, cinq puits, deux quartiers de stockage distincts pour les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) accessibles chacun par deux galeries, une pour l'exploitation, l'autre pour les travaux.

Les déchets seront déposés au sein des structures ventilées suivantes :

- pour les déchets HA0, des alvéoles borgnes en béton de diamètre 60 cm et longueur 20 m avec un chemisage en acier;

[13] Lieu où sont déversés des matériaux en vrac (verse à stérile, ou terril, verse à remblai). Source Larousse.

- pour les autres déchets HA, des alvéoles borgnes en béton de diamètre 60 cm et de longueur 150 m avec un chemisage en acier
- pour les déchets MA-VL, des alvéoles en béton de diamètre 8 m et de longueur 500 m.

1.2.4 Liaison inter-sites

Cette liaison, d'une emprise totale de 46 ha, sera située dans la Meuse sur les communes de Bure et Mandres-en-Barrois. Elle se compose d'une route ouverte au public de 5 km reliée à la RD 60/960 permettant l'accès aux sites et aux parcelles des exploitations agricoles et de deux infrastructures privées de 4 km : une piste routière et une bande transporteuse semi-enterrée.

1.2.5 Installation ferroviaire terminale embranchée (ITE) et plateforme logistique ferroviaire

Cette voie ferrée d'une emprise totale de 112 ha aura une longueur de 14 km dont 10 km en réhabilitation d'une ancienne voie ferrée désaffectée. Elle servira à acheminer les colis de déchets et les matériaux nécessaires aux travaux. Le trafic prévu, exclusivement diurne, est de trois trains de fret par jour pendant la construction, puis de huit à 76 trains de déchets par an et un à deux trains de fret par semaine, en phase d'exploitation.

1.2.6 Ligne électrique à 400 kV

Une ligne à 400 kV jouxte le site. Elle sera raccordée à un poste transformateur relié à une liaison électrique souterraine à 90 kV afin d'alimenter le site. La ligne et ses aménagements, sous maîtrise d'ouvrage de Réseau de transport d'électricité (RTE) sont partie intégrante du périmètre du projet.

1.2.7 Enchaînement des opérations

Les premières opérations après la mise en service s'inscrivent dans le cadre d'une phase industrielle pilote qui permettra de réaliser tous les essais en vraie grandeur. Pendant les dix à quinze premières années de cette phase pilote, toutes les manipulations seront éprouvées sur des colis non radioactifs. Puis, dans une deuxième phase de cinq à dix ans, des colis radioactifs pourront être manipulés, toujours à titre expérimental. La phase d'exploitation qui suivra consistera, pendant environ 100 à 150 ans, à acheminer des colis dans les alvéoles souterraines tandis que de nouvelles alvéoles seront creusées. La conception du projet permet de séparer parfaitement les opérations de stockage et les opérations de creusement de nouvelles galeries et alvéoles. La figure 4 présente une vue synoptique de l'ensemble des opérations du projet et de leur échelonnement dans le temps ainsi que de leurs maîtres d'ouvrage.

Les opérations liées au démantèlement et à la surveillance de long terme ne sont pas décrites du fait de leur éloignement temporel séculaire, mais font partie du projet. Elles feront l'objet d'études d'impact le moment venu. L'Ae observe que la notion de démantèlement est difficile à prendre en considération à ce stade de la connaissance sur les techniques de traitement des déchets. En revanche, la question de la surveillance de long terme ne peut être évacuée et doit être prise en compte dès à présent : elle peut en effet avoir des conséquences sur les décisions à prendre à court terme sur les usages du territoire.

L'Ae recommande de présenter la surveillance à long terme qui est prévue et les moyens employés pour diminuer les risques à long terme après fermeture du stockage.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R3

L'Andra prend acte de cette recommandation et indique qu'au stade du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique, les risques à long terme (cf. Chapitre 18.2 du volume IV de la pièce 6) et les enjeux de la phase de surveillance sont appréhendés dans leur globalité. La surveillance à long terme prévue et les moyens employés pour diminuer les risques à long terme après fermeture seront détaillés de manière progressive lors des dossiers ultérieurs relatifs à l'installation nucléaire de base conformément à la réglementation (dossier de demande d'autorisation de création, dossier de mise en service, …). En complément, afin de garantir que les activités en surface ne sont pas susceptibles de remettre en cause l'intégrité du stockage, un périmètre de protection des ouvrages souterrain sera mis en place.

Comme indiqué au chapitre 18.1 du volume IV de l'étude d'impact, « après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, la sûreté est assurée de façon passive, c'est-à-dire que les personnes et l'environnement sont protégés des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir. ».

Une fois les installations nucléaires de surface démantelées et l'installation souterraine remblayée et scellée, la couche du Callovo-Oxfordien ainsi que les dispositifs ouvragés mis en place à la fermeture (scellements en particulier au niveau des liaisons surface-fond et des galeries) assurent la protection de l'homme et l'environnement de manière passive.

Le dossier de demande d'autorisation de création, conformément à l'article R. 593-16 du code de l'environnement, comprendra une pièce dite « Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance » qui présentera les principes méthodologiques, les étapes et les délais envisagés pour le démantèlement des parties de l'installation qui ne seront plus nécessaires à l'exploitation du stockage, pour la fermeture et pour la surveillance de l'installation une fois l'autorisation de fermer définitivement l'installation souterraine du centre de stockage promulguée.

Par ailleurs, afin de s'assurer qu'une fois l'installation souterraine fermée, les dispositifs naturels et ouvragés protègent l'homme et l'environnement de façon passive, des activités de surveillance du comportement des ouvrages souterrains et des perturbations éventuelles apportées par le stockage sur la couche du Callovo-oxfordien (suivi par exemple du comportement mécanique et des caractéristiques hydrauliques) seront mises en œuvre. À cette fin, des forages réalisés dès la phase de construction initiale pourront être mis à profit. La surveillance après fermeture dont la durée minimale sera fixée par l'Autorité de sureté nucléaire (ASN) dans le décret de démantèlement et de fermeture de l'INB, comprendra des dispositifs déjà mis en place avant la fermeture définitive et maintenus si besoin après la fermeture du centre de stockage Cigéo et préconisera éventuellement des dispositifs complémentaires.

Tous les dispositifs de suivi après fermeture seront choisis de manière à préserver la couche du Callovo-Oxfordien afin qu'elle puisse jouer pleinement son rôle central vis-à-vis de la protection à long terme de l'homme et l'environnement. Plusieurs pistes sont à ce stade envisageables : techniques non intrusives en surface (géophysique…), mesures dans des forages instrumentés réalisés depuis la surface jusqu'à l'Oxfordien calcaire situé au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 5.1.1.1 du volume IV de l'étude d'impact). Un périmètre de protection des ouvrages souterrains, prévu obligatoirement par l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, sera défini et permettra de réglementer, via des servitudes, les usages des terrains.

Suite au décret de démantèlement et à l'issue des opérations préalables à la fermeture définitive de l'installation, une décision de l'ASN viendra autoriser le passage en phase de surveillance sur la base d'un dossier de l'Andra qui portera notamment la démonstration de l'efficacité des actions de surveillance. Cette autorisation précisera les modalités envisagées pour la conservation et la transmission de la mémoire de l'installation pendant et après la phase de surveillance (article R. 593-75 VII du code de l'environnement).

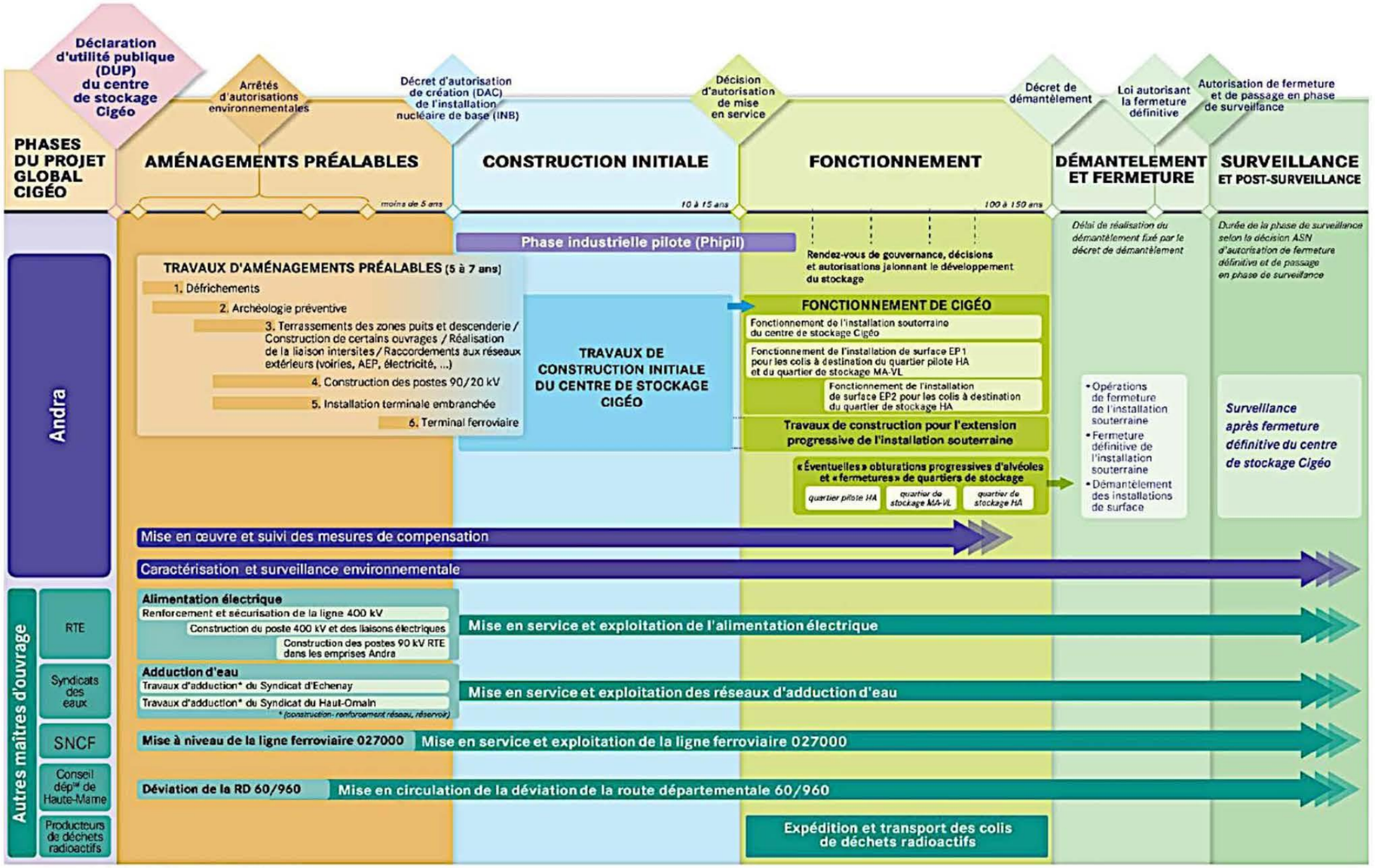


Figure 4 : Schéma synoptique des différentes phases du projet Cigéo. Source dossier

Le dossier indique que la fermeture des alvéoles pourra être anticipée préalablement à la fermeture définitive « *si les générations en charge du centre de stockage le décident* ». La manutention des colis entre le pied de la descenderie et les alvéoles fait appel à des chariots permettant le chargement et le déchargement automatiques des colis. Le dossier indique que le déstockage d'un colis pourrait durer un peu moins longtemps que son stockage. Il n'est pas explicité comment sera organisé l'extraction d'une série de colis tout au long d'une alvéole. La faisabilité du cheminement inverse d'un ensemble de colis sur une distance pouvant atteindre 150 m reste à démontrer (cf. § 2.2.1).

1.2.8 Coût du projet

Le coût des investissements nécessaires à la mise en service de Cigéo est estimé en 2019 à 5,06 milliards d'euros hors taxes (G€ HT). Le coût total du fonctionnement du centre sur 100 à 150 ans, envisagé dans le cas où la loi l'autoriserait, est estimé à 5,69 G€ HT valeur de 2018.

Pour mémoire, la ministre chargée de l'énergie a arrêté le coût global de la gestion des déchets HA et MA-VL à 25 G€ HT en janvier 2016[14]. Ce coût représente un compromis entre les estimations des producteurs de déchets et de l'Andra, l'estimation de cette dernière étant de 34 G€. Cette estimation conditionne le dimensionnement des provisions que doivent faire les producteurs de déchets.

1.3 Procédures relatives au projet

Le projet est soumis à étude d'impact du fait qu'il relève de plusieurs rubriques du tableau annexé à l'article R. 122-2 du code de l'environnement et notamment, les installations nucléaires de base, travaux, ouvrages de transport et de distribution d'énergie électrique. Le dossier comporte une évaluation des incidences sur les sites du réseau Natura 2000[15] en application de l'article R. 122-5 du code de l'environnement et les évaluations socio-économiques requises par l'article L. 1511-2 du code des transports et le décret du 23 décembre 2013[16]. Il fera l'objet d'une contre-expertise indépendante et d'un avis du secrétariat général pour les investissements[17] préalablement à l'enquête publique. Les évaluations environnementales des trois modifications de documents d'urbanisme rendues nécessaires pour le projet sont jointes au dossier.

Le dossier indique que Cigéo n'est pas susceptible d'avoir des incidences notables sur l'environnement d'un autre État et qu'en conséquence il n'a pas été procédé à une consultation spécifique. Considérant la dimension exceptionnelle du projet et sa durée qui rend pour l'instant incertain l'appréciation de l'extension de ses impacts, la question d'activer les mécanismes de consultation internationaux prévus par le droit européen et notamment ceux de la convention d'Espoo devra avoir été réévaluée pour la demande d'autorisation de création du stockage.

[14] Arrêté du 15 janvier 2016 relatif au coût afférent à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue

[15] Les sites Natura 2000 constituent un réseau européen en application de la directive 79/409/CEE « Oiseaux » (codifiée en 2009) et de la directive 92/43/CEE « Habitats faune flore », garantissant l'état de conservation favorable des habitats et espèces d'intérêt communautaire. Les sites inventoriés au titre de la directive « habitats » sont des zones spéciales de conservation (ZSC), ceux qui le sont au titre de la directive « oiseaux » sont des zones de protection spéciale (ZPS).

[16] Décret n° 2013-1211 du 23 décembre 2013 relatif à la procédure d'évaluation des investissements publics en application de l'article 17 de la loi n° 2012-1558 du 31 décembre 2012 de programmation des finances publiques pour les années 2012 à 2017

[17] Le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) est chargé, sous l'autorité du Premier ministre, de la mise en œuvre du Programme d'investissements d'avenir (PIA), un programme exceptionnel de soutien à l'innovation dans des secteurs clés pour créer emplois et croissance durables. Il assure également l'évaluation socio-économique des grands projets d'investissement public ainsi que la coordination du plan d'investissement européen (« Plan Juncker »).

» RÉPONSE DE L'ANDRA AU QUESTIONNEMENT DE L'AE

L'Andra prend acte de ce questionnement et indique que dans le présent dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique, aucune incidence potentielle de quelque nature que ce soit n'est identifiée en dehors du territoire français que ce soit en fonctionnement normal ou accidentel. La nécessité d'une consultation spécifique à la convention d'Espoo sera réévaluée par l'État lors de l'instruction du dossier de demande d'autorisation de création du centre de stockage.

La question de l'opportunité d'engager une consultation formelle des pays, membres de l'Union européenne ou parties à la convention sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement dans un contexte transfrontière, signée à Espoo le 25 février 1991, sera réévaluée par l'État (par le service du ministère de la transition écologique en charge de la sûreté nucléaire) lors de l'instruction du dossier de demande d'autorisation de création en application de l'article R. 593-22 al 5 du code de l'environnement qui prévoit que « *Lorsqu'une partie du territoire d'un État étranger est contiguë au secteur de consultation défini à l'article R. 593-5 ou, même si cette condition n'est pas remplie, lorsqu'il estime, de sa propre initiative ou sur demande des autorités d'un autre État membre de l'Union européenne ou partie à la convention du 25 février 1991 sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement dans un contexte transfrontière signée à Espoo, que l'installation est susceptible d'avoir des incidences notables sur l'environnement de cet État, le préfet met en œuvre les consultations prévues au I de l'article R. 122-10.* »

L'Andra étant un établissement public sous tutelle de la ministre chargée de l'environnement, l'avis d'autorité environnementale est délivré par l'Ae.

1.4 Principaux enjeux environnementaux du projet relevés par l'Ae

Pour l'Ae, les principaux enjeux environnementaux du projet sont les suivants :

- la sécurité après fermeture du site de stockage pour une période très longue, de plusieurs dizaines de milliers d'années ;
- le risque de dissémination de la radioactivité dans l'environnement notamment aquatique ;
- la préservation de la santé humaine du fait du risque de dispersion chronique ou accidentelle de substances radioactives dans l'air, les sols ou les eaux et de leur absorption par inhalation ou ingestion ;
- la protection des milieux naturels et de la biodiversité.

Cet avis présente une première analyse de la prise en compte de l'environnement par le projet, en complément des nombreux expertises et avis fournis par d'autres organismes (ASN, IRSN notamment). Au stade d'une demande de déclaration d'utilité publique, l'Ae aborde principalement les enjeux environnementaux de court et moyen termes et évoque les questions à se poser par précaution pour le long terme. L'analyse des risques et des impacts à long et très long termes a vocation à être complétée et affinée à l'occasion des actualisations successives de l'étude d'impact, et particulièrement pour la demande d'autorisation de création de l'installation de stockage.

2 Analyse de l'étude d'impact

L'étude d'impact a considéré une aire d'étude rapprochée et une aire d'étude immédiate ; une autre aire d'étude concerne la ligne électrique à très haute tension (400 kV). Elle est très détaillée et de grande qualité. Elle comporte de nombreuses illustrations et des présentations didactiques des notions abordées. Chaque chapitre a une conclusion très claire.

2.1 État initial

2.1.1 Milieux naturels et physique

2.1.1.1 Qualité de l'air

L'analyse de la qualité de l'air à l'état initial repose sur les données du réseau de surveillance mesurées à la station d'Houdelaincourt jusque 2018 et sur des campagnes de mesures effectuées en 2012 et 2016. La qualité de l'air est bonne sur ce territoire très peu dense. Seules les concentrations en ozone et en particules de diamètre inférieur à 2,5 µm ($PM_{2,5}$) montrent des dépassements d'objectifs de qualité. Les objectifs pour la santé humaine sont dépassés environ une année sur deux pour l'ozone, ceux qui concernent la végétation le sont systématiquement[18]. Pour les $PM_{2,5}$, l'objectif de qualité pour la santé humaine est dépassé en 2012 et 2015 mais respecté en 2017 et 2018. La majorité des émissions d'oxydes d'azote et de particules provient de l'agriculture.

[18] Le seuil pour la végétation est de 18 000 µg/m³.h en moyenne calculée sur 5 ans. Il se mesure en AOT 40 (exprimé en µg/m³.heure) qui signifie la somme des différences entre les concentrations horaires supérieures à 80 µg/m³ et le seuil de 80 µg/m³ durant une période donnée en utilisant uniquement les valeurs sur 1 heure mesurées quotidiennement entre 8 heures et 20 heures. (40 ppb ou partie par milliard=80 µg/m³)

Pour ce qui concerne la radioactivité dans l'air, le territoire a été peu affecté par les retombées des essais nucléaires atmosphériques et de la catastrophe de Tchernobyl. Les installations nucléaires les plus proches sont les centres de stockage des déchets nucléaires TFA et FA-VL de l'Aube, situés à une cinquantaine de kilomètres ; leur signature radioactive est indétectable sur le site de Cigéo. Le dossier fournit les résultats d'observations de la radioactivité du réseau Opéra de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) dont une station a été installée par l'Andra sur la commune de Houdelaincourt. Les activités sont du même ordre de grandeur que la moyenne nationale sauf pour le tritium qui est plus faible à Houdelaincourt.

2.1.1.2 Qualité des sols

Le dossier présente une analyse exhaustive de la qualité des sols. Cette analyse est complétée par une évaluation de leur qualité biologique qui est bonne avec néanmoins la présence d'hydrocarbures au niveau de l'ancienne plateforme ferroviaire. Des analyses de présence de radionucléides réalisées par l'IRSN montrent des valeurs conformes aux teneurs des sols dans des zones à l'écart des activités nucléaires.

2.1.1.3 Sous-sol

Le sous-sol est étudié depuis une trentaine d'années par le maître d'ouvrage dans l'objectif de construire un stockage souterrain de matières radioactives. Il se situe sur la frange est du Bassin parisien caractérisé par une succession de couches argileuses et calcaires responsables du relief caractéristique en « *cuestas*[19] ». La couche choisie pour le stockage est formée d'argilite grise d'aspect très compact. La géologie du territoire se caractérise par une très grande stabilité, aucun événement tectonique n'ayant été observé depuis que les mesures sont faites, c'est-à-dire plus de 50 ans. D'après le dossier, les failles repérées sont stables depuis 25 millions d'années (figure 5).

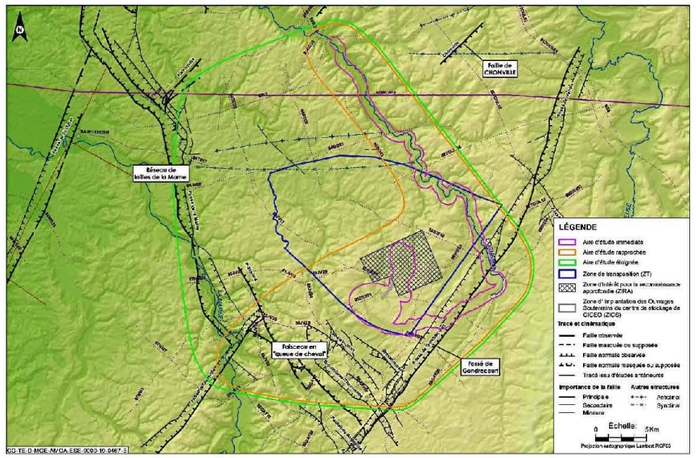


Figure 5 : Carte du réseau de failles autour de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie du stockage Cigéo. Source : dossier.

[19] La cuesta est une forme de relief dissymétrique constituée d'un côté par un talus à profil concave (le front), en pente raide et, de l'autre, par un plateau doucement incliné en sens inverse (le revers). Les cuestas se trouvent aux bordures des bassins sédimentaires peu déformés. Le relief correspondant peut également être appelé une côte. Source Wikipédia

La carte sismique de la France présentée dans le dossier est à l'échelle de l'ensemble du territoire national. Elle date de 2009. Le dossier mériterait d'être actualisé à l'échelle du territoire concerné.

Peu de roches sont ou ont été exploitées au voisinage du site. On notera toutefois la présence de carrières à ciel ouvert de calcaire du Barrois. La roche exploitée, l'oolithe de Bure, est une pierre de taille de qualité. Une carrière exploitant des calcaires de l'Oxfordien pour le marché des granulats est active à Gondrecourt-le-Château.

Le dossier ne comporte pas d'analyse de la composition chimique du sous-sol, en particulier de l'argilite qui a vocation à constituer les verses en surface. Il importe de s'assurer que ces verses ne comportent pas de substances toxiques.

L'Ae recommande de compléter le dossier par l'analyse de la composition chimique des matériaux qui seront extraits du sous-sol pour constituer les verses afin d'évaluer le risque de transfert de matières solides toxiques dans l'air et les eaux.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R4

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants qui confirment que ces poussières ne constituent pas un danger pour la santé humaine.

Les matériaux conservés temporairement en surface du centre de stockage sous forme de verses seront constituées des déblais issus de l'excavation des liaisons surface-fond et des galeries souterraines du centre de stockage Cigéo, soit environ 90 % de déblais issus de la couche du Callovo-Oxfordien et environ 10 % par les marnes du Kimméridgien et les Calcaires de l'Oxfordien. Ils sont donc principalement constitués des argilites de l'unité lithostratigraphique dite « argileuse » du Callovo-Oxfordien.

Les argilites du Callovo-Oxfordien ont fait l'objet de nombreuses analyses minéralogiques et géochimiques menées depuis plus de 20 ans, et publiées pour beaucoup dans des revues scientifiques (Gaucher *et al.,* 2004 (9) ; Belcourt, 2009 (10); Marty *et al.,* 2018 (11)).

Comme indiqué dans le chapitre « Sous-sol » de l'étude d'impact (cf. Chapitre 4 dans le volume III), les argilites de l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien sont composées en masse à environ 95 % de minéraux primaires : ~ 40 % de minéraux argileux, muscovite et biotite ; ~30 % de carbonates, principalement de la calcite ; et ~ 25 % de tectosilicates (quartz et feldspaths).

Les autres minéraux présents dans les argilites (environ 5 %) sont principalement des sulfures, dont de la pyrite et de la matière organique. La pyrite (FeS_2) est présente dans toute la formation avec des teneurs en moyenne de 1 % et localement jusqu'à 3 %. Les autres sulfures identifiés sont la sphalérite (sulfure de zinc) et la chalcopyrite (sulfure de fer et de cuivre). La matière organique est présente naturellement avec des teneurs comprises entre 0,5 % et 2 %. La présence de sulfures et de matières organiques sont révélatrices des conditions anoxiques et réductrices au sein de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les connaissances acquises indiquent que les argilites du Callovo-Oxfordien contiennent relativement peu d'éléments toxiques (tels que des métaux et métalloïdes), en comparaison avec des déblais miniers par exemple, et dans des ordres de grandeur similaires au fond géochimique des sols calcaires rencontrés sur le territoire d'implantation du centre de stockage Cigéo.

Le tableau 2-2 indique la composition chimique moyenne des argilites du Callovo-Oxfordien.

La chimie des eaux contenues au sein des argilites (eaux porales naturelles, eaux de percolation…) dépend principalement de la nature et de la teneur en minéraux, des processus d'oxydo-réduction (notamment en présence ou non d'oxygène) et des processus de sorption[6] qui peuvent piéger des éléments chimiques en surface de certains minéraux. Les minéraux argileux, de par leur nature, peuvent ainsi incorporer et retenir à leur surface de nombreux éléments chimiques (cations alcalins et alcalino-terreux, métaux, terres rares…). Quant aux sulfures, ils contiennent souvent des éléments traces métalliques (As, Ni, Co, Pb, Zn, Cu, Cd, Mo…), de même que la matière organique (cf. Tableau 2-2).

Différentes études réalisées à partir d'argilites excavées depuis le Laboratoire souterrain ont établi que lorsque les argilites sont exposées à l'atmosphère (i.e. en présence d'oxygène), notamment à la lixiviation par les eaux de pluie (Scholtus *et al,* 2009 (12)), il se produit les processus géochimiques suivants :

- l'oxydation des sulfures et la dissolution partielle des carbonates dont le pouvoir tampon permet de neutraliser sur le long terme l'acidité produite par l'oxydation des sulfures : des expériences en laboratoire (Marty *et al.,* 2018 (11)) ont en effet montré que des phénomènes de drainage acide liés à l'oxydation des pyrites ne peuvent pas se produire dans les argilites du Callovo-Oxfordien grâce à la neutralisation du pH par les carbonates. Cela est confirmé par un suivi en dispositif d'essai en colonne sur le terrain toujours en cours depuis 2014 (Tremosa *et al.,* 2020 (13)). L'oxydation des sulfures génère néanmoins de larges quantités de sulfates ;
- l'oxydation des pyrites et la minéralisation de la matière organique peuvent libérer les éléments traces métalliques qu'ils contiennent :

  Il a été montré que les concentrations des éléments métalliques dans les eaux sont limitées, ces éléments étant rapidement réabsorbés sur les minéraux secondaires formés (oxyhydroxydes) (Tremosa *et al.,* 2020 (13)).

Les matériaux mis en verses ne génèrent donc pas d'éléments chimiques toxiques. Ce sont principalement les quantités de sulfates et de matières en suspension ainsi que quelques espèces ioniques cumulées (conductivité) dans les eaux de ruissellement et de percolation issues des verses qui sont pris en compte et font l'objet d'attention vis-à-vis d'incidences possibles sur les milieux aquatiques.

[6] Phénomène physico-chimique au cours duquel une espèce chimique se concentre à la surface d'un solide (dans ce cadre des minéraux) conduisant à son immobilisation.

Tableau 2-2 *Composition chimique (moyenne ± écart-type) des argilites de la couche géologique du Callovo-Oxfordien*

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	MnO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
unité	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Moy. ± ET	44,8 ± 6,5	11,1 ± 2,9	4,1 ± 1,0	2,3 ± 0,3	0,03 ± 0,01	15,0 ± 5,6	0,3 ± 0,1	2,7 ± 0,6	0,6 ± 0,1	0,1 ± 0,1
	S	As*	Ag	B	Ba	Be*	Bi*	Cd*	Ce	Co
unité	%	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*
Moy. ± ET	0,8 ± 0,3	11 ± 3	<0,2	110 ± 34	196 ± 48	1,9 ± 0,5	0,18 ± 0 08	0,21 ± 0,11	56 ± 13	13 ± 4
	Cr	Cu	La	Li	Mo*	Nb*	Ni	Pb*	Sb*	Sc*
unité	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*
Moy. ± ET	87 ± 20	15 ± 5	32 ± 4	56 ± 25	0,5 ± 0,2	13 ± 3	40 ± 12	14 ± 4	0,5 ± 0,1	13 ± 1
	Se*	Sn*	Sr	U	V	W*	Y*	Zn	Zr	
unité	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	*mg/kg*	
Moy. ± ET	0,58 ± 0,03	2,4 ± 0,5	386 ± 196	2,0 ± 0,5	104 ± 30	1,1 ± 0,6	20 ± 3	92 ± 39	156 ± 34	

** éléments traces dont les concentrations moyennes ont été calculées avec un nombre d'échantillons plus faible analysés avec une méthode plus précise que les autres données disponibles.*

2.1.1.4 Eaux et milieux aquatiques

L'hydrologie du secteur est caractérisée par de nombreux karsts, à l'origine de pertes importantes sur les cours d'eau, créant des tronçons en assec permanent ou temporaire, selon la profondeur de la nappe. Le fonctionnement hydraulique des cours d'eau sur certaines sections dépend davantage des fluctuations de niveau des eaux souterraines que du ruissellement sur leur bassin versant.

Les cours d'eau temporaires ou à faibles débits sont très sensibles aux pollutions, du fait de la nature karstique du sous-sol et de la faible épaisseur des sols qui permettent un transfert rapide des polluants depuis la surface.

Le dossier ne précise pas l'évolution probable de la qualité des eaux (évolution de l'état initial sans le projet) dans l'avenir. À l'échelle d'un projet de la durée de Cigéo (150 ans), l'Ae considère qu'il conviendrait de considérer que toutes les masses d'eau sont revenues au bon état[20].

» RÉPONSE DE L'ANDRA AU QUESTIONNEMENT DE L'AE

L'Andra prend acte de ce questionnement et confirme au sujet de la qualité des eaux, que le tableau 21-1 de l'étude d'impact indique bien que la qualité des cours d'eau et des masses d'eau souterraines devrait s'améliorer, au regard de la politique nationale engagée, de manière à atteindre les objectifs de la Directive cadre sur l'eau (DCE) et du SDAGE par l'amélioration des pratiques agricoles et d'assainissement.

Le chapitre 21 du volume IV de l'étude d'impact répond à l'exigence de l'article R. 122-5 II 3° du code de l'environnement. Il indique « *Une description* [de l'évolution] *des aspects pertinents de l'état actuel de l'environnement en cas de mise en œuvre du projet, ainsi qu'un aperçu de l'évolution probable de l'environnement en l'absence de mise en œuvre du projet, dans la mesure où les changements naturels par rapport au scénario de référence peuvent être évalués moyennant un effort raisonnable sur la base des informations environnementales et des connaissances scientifiques disponibles* ».

Les évolutions de l'environnement sans le projet qui pourraient être observables à l'horizon 2030 et 2050 seront principalement liées à l'évolution du milieu humain et notamment l'évolution de l'urbanisation et au changement climatique.

Un tableau 21-1 indique qualitativement l'évolution possible des différents aspects de l'environnement décrits par ailleurs dans l'état actuel de l'environnement.

La radioactivité des eaux et du milieu aquatique associé dans l'aire d'étude rapprochée est très faible, à des niveaux cohérents avec le bruit de fond attendu dans des zones situées à l'écart des activités nucléaires actuelles.

2.1.1.4.1 Eaux souterraines

L'analyse des eaux souterraines est menée en considérant non seulement les masses d'eau, mais également leur déclinaison en aquifères et nappes. Cette approche permet de mieux appréhender l'état initial et l'impact du projet.

Les installations de surface de Cigéo sont positionnées à l'aplomb des aquifères des calcaires tithoniens du Barrois (masse d'eau FRHG 303), de Dommartin et sub-lithographiques, tous trois fissurés et karstifiés. Lorsque la karstification s'est développée ou que les fissurations sont connectées, leur perméabilité apparente peut être très élevée (supérieure à 10^{-3} m/s). Cigéo est sur un plateau et l'alimentation des aquifères s'y fait par les précipitations. Elles sont drainées par la Saulx, l'Orge et l'Ormançon et quelques émergences.

[20] Cette vision devrait, en toute rigueur, s'appliquer aux autres compartiments de l'environnement, mais en ce qui concerne l'eau elle fait d'ores et déjà l'objet d'un engagement à travers l'objectif de bon état de la directive cadre sur l'eau.

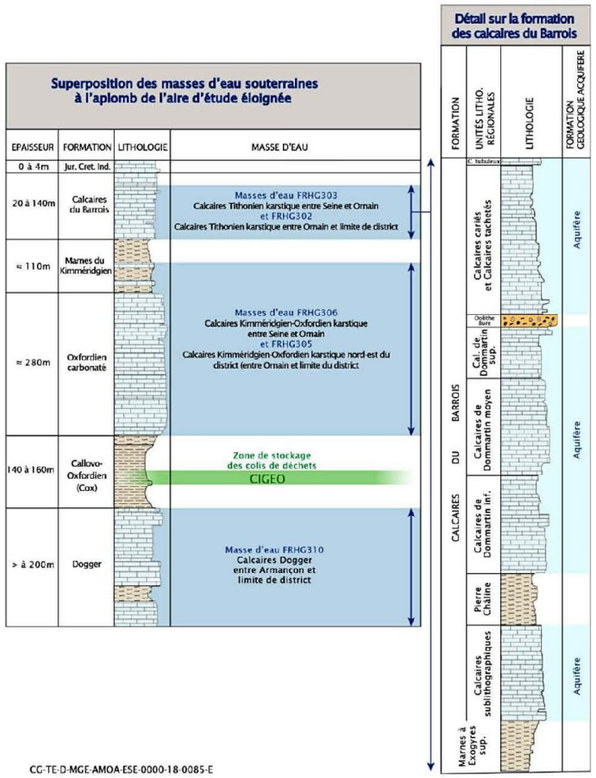


Figure 6 : Correspondances « masses d'eau » et « aquifères » (Source : dossier)

Les installations souterraines sont implantées dans la couche d'argile du Callovo-Oxfordien. La descenderie traverse des couches plus ou moins perméables (calcaires du Barrois, marnes du Kimmeridjien et Oxfordien carbonaté). Les marnes du Kimmeridjien ne sont pas considérées comme aquifères, mais présentent deux bancs calcaires d'une quinzaine de mètres. Au droit du stockage Cigéo, les calcaires de l'Oxfordien sont le siège d'une seule et même nappe, de perméabilité apparente élevée, localement jusqu'à 10^{-3} m/s dans les secteurs fracturés. Cette nappe constitue un enjeu important, directement en contact avec la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien. Le BRGM la classe comme une ressource à protéger dite « d'ultime recours »[21], stratégique pour l'alimentation en eau potable. Son intérêt est minimisé par le dossier qui indique une vitesse d'écoulement très faible, de l'ordre d'un mètre par siècle. L'Ae s'interroge sur cette très faible vitesse d'écoulement, alors même que cette nappe est exploitée, ce qui génère nécessairement des écoulements non négligeables.

L'Ae recommande de réévaluer l'enjeu que constitue la nappe de l'Oxfordien.

[21] Rapport BRGM R38142, octobre 1994 : « Ressources en eau souterraines protégés dites d'ultimes recours – phase 1 – inventaire national »

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R5

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour son dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants, qui amènent toutefois à continuer à considérer l'enjeu de la nappe de l'Oxfordien comme modéré ou fort selon l'usage.

Les travaux de caractérisation de l'Oxfordien carbonaté menés par l'Andra dans le secteur du site d'implantation du projet du centre de stockage Cigéo et les données de caractérisation disponibles conduisent à identifier trois schémas d'écoulements de l'eau, et de ce fait des caractéristiques d'aquifères différentes :

- typologie 1 : l'Oxfordien carbonaté peut être à l'affleurement, comme en dehors de la zone d'implantation du projet de centre de stockage Cigéo et de la zone de transposition (ZT) de manière générale, par exemple au sud-est du fossé de Gondrecourt. Il est alors altéré et présente de fait des perméabilités élevées permettant son exploitation pour la ressource en eau (ex. AEP de Gondrecourt-le-Château ou d'Amanty) ;
- typologie 2 : l'Oxfordien carbonaté peut être sous couverture et localement fracturé et karstifié, comme en dehors de la zone d'implantation du projet Cigéo et de la ZT de manière générale, en particulier à environ 10 à 15 km au sud-ouest. Sa perméabilité peut ainsi localement présenter des valeurs élevées de l'ordre de 10^{-3} m.s^{-1}, et l'Oxfordien carbonaté constituer une ressource en eau locale (ex. AEP de Lezeville) ;
- typologie 3 : l'Oxfordien carbonaté peut être sous couverture et non fracturé, comme au sein de la zone d'implantation du projet de centre de stockage Cigéo et de la ZT de manière générale. Sa perméabilité y est alors faible, en moyenne de l'ordre de 10^{-8} m.s^{-1}, de sorte que l'Oxfordien carbonaté est peu compatible avec une ressource en eau exploitable.

Les captages d'alimentation en eau potable (AEP) référencés dans la base Infoterre du BRGM se situent tous dans les zones de typologie 1 et 2.

La nappe de l'Oxfordien du bassin parisien est classée par le BRGM comme une ressource à protéger dite « d'ultime recours ». Cette classification se base sur les caractéristiques globales de la nappe (échelle macro) mais il est classiquement considéré que la productivité de la nappe de l'Oxfordien est très dépendante du degré de fissuration et de fracturation des différents faciès de cette unité géologique. Au niveau du projet de centre de stockage Cigéo, l'Oxfordien carbonaté présente une typologie 3, sous couverture et non fracturé, avec une perméabilité faible, en moyenne de l'ordre de 10^{-8} m.s^{-1}, de sorte que l'aquifère présente une productivité limitée.

Au niveau de l'enjeu des eaux souterraines, l'ensemble des nappes d'eau est considéré avec un enjeu modéré à fort selon la présence ou non d'un usage en eau potable pour les populations au niveau de l'aire d'étude éloigné du projet global Cigéo.

Les aquifères du Dogger (Jurassique moyen), situés sous les argiles du Callovo-Oxfordien et donc sous le futur stockage souterrain, sont formés de deux niveaux calcaires séparés par des marnes. Selon le dossier, leur vitesse d'écoulement est également faible, de l'ordre de 5 mètres par siècle[22].

Le dossier met en perspective le projet avec les périmètres de protection de captage.

Captages	Position du captage et de ses périmètres de protection	Productions
Captage de Rupt-aux-Nonains (AEP Syndicat mixte des eaux Sud-Meuse)	Zone descenderie dans le périmètre de protection éloignée	410 000 m³ en 2017
Source et forage de Naillemont (AEP syndicat des eaux Horville-Tourailles)	Projet de périmètre de protection rapprochée en partie dans l'AEI[23]	3 700 m³ en 2015, non exploités en 2017
Source de Manonfosse et forage 1977 (AEP syndicat des eaux d'Echenay)	Périmètre de protection rapprochée en partie dans l'AEI	Étude de l'aire d'alimentation de captage (AAC) en cours d'étude. L'AAC ne serait pas en cohérence avec les périmètres de protection définis par l'hydrogéologue agréé, selon une campagne de traçage.
Forage du Muleau (AEP Gondrecourt-le-Château	Périmètre de protection éloigne en partie dans l'AEI	150 000 m³ en 2017
Puits alluvial (AEP Gondrecourt- le-Château)	Captage dans l'AEI	Prélèvement dans la nappe alluviale de l'Ornain
Puits d'Houdelaincourt (AEP Houdelaincourt)	Projets de périmètres de protection rapprochée dans l'AEI de la ligne ferroviaire	20 000 m³ en 2017
Forage de Baudignécourt (AEP Baudignécourt et Demange-aux-eaux)	Périmètre de protection rapprochée en partie dans l'AEI de la ligne ferroviaire	53 000 m³ en 2017
Forage AEP de Saint-Jeoire	Captage dans l'AEI dans l'AEI de la ligne ferroviaire	45 000 m³ en 2017
Captage AEP de Menaucourt	Périmètre de protection éloignée en partie dans l'AEI de la ligne ferroviaire	550 000 m³/an
Forage de Givrauval	Forage dans l'AEI de la ligne ferroviaire	500 000 m³/an

Tableau 1 : Position des captages et de leurs périmètres de protection au regard des installations de Cigéo et de l'aire d'étude immédiate (AEI) (Source : rapporteurs à partir des données Cigéo)

Il serait intéressant de présenter l'analyse sur les captages d'alimentation en eau potable (AEP) à partir non pas des seuls périmètres de protection mais dans son ensemble, à partir de la cartographie de l'aire potentielle d'influence[24] des installations de surface et de la descenderie sur les eaux souterraines. Elle pourrait être établie avec l'aide de la modélisation de la nappe, produite dans le cadre de la démarche ERC[25], avec un niveau de précision élevé compte tenu du nombre de piézomètres installés et de points d'émergence de la nappe, éventuellement complétée de traçages. Cette approche aurait en outre tout son sens du fait de la présence d'une nappe très vulnérable à l'aplomb du projet, la nappe des calcaires du Barrois.

L'Ae recommande de produire la cartographie de l'aire potentielle d'influence des installations de surface et de la descenderie sur les eaux souterraines.

[22] Il est étonnant qu'une nappe de perméabilité plus faible que l'Oxfordien, plus profonde et donc avec des zones d'alimentation plus éloignée présente des vitesses de circulation plus élevées. La vitesse de circulation dans une nappe profonde est toujours très faible en l'absence d'exploitation et avec des secteurs d'alimentation éloignés.

[23] Aire d'étude immédiate

[24] L'aire potentielle d'influence est ici le « tube de courant » qui rassemble l'ensemble des circulations d'eau (« lignes de courant ») prenant leur origine sur les installations de surface ou interceptées par la descenderie.

[25] La séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC) a pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et si possible, de compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R6

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour son dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants.

Les principaux ouvrages du projet de centre de stockage Cigéo qui pourraient influencer les eaux souterraines sont les installations de surface en zones puits et descenderies implantés dans la formation des Calcaires du Barrois et les liaisons surface-fond (descenderies et puits verticaux) qui traversent l'ensemble des formations depuis la surface jusqu'aux installations souterraines situées dans la formation argileuse et imperméable du Callovo-Oxfordien.

Aire potentielle d'influence des installations de surface sur les eaux souterraines

Les installations de surface du centre de stockage Cigéo seront implantées dans la formation géologique des Calcaires du Barrois. Cette formation ne forme pas un aquifère unique mais elle se divise en plusieurs sous-aquifères structurés par la présence de niveaux perméables (calcaires sublithographiques, calcaires de Dommartin et calcaires cariés et tachetés) et semi-perméables (Pierre Châline, Oolithe de Bure), avec à sa base les Marnes Kimméridgiennes constituant une barrière imperméable. Ainsi, seuls les Calcaires du Barrois sont concernés par de potentielles influences hydrauliques des installations de surface.

Les écoulements dans les Calcaires du Barrois sont globalement orientés vers le nord-nord-est, en lien avec le pendage des couches géologiques, la fracturation et les phénomènes karstiques. Il existe de plus des échanges entre les eaux souterraines et les eaux du système hydrographique (pertes et résurgences).

L'aire d'influence hydraulique potentielle des installations de surface sur les eaux souterraines du Calcaire du Barrois se situe en aval hydraulique des installations de surface du centre de stockage Cigéo. En tête de bassin versant, les écoulements s'orientent pour partie en suivant la morphologie du substratum de la formation aquifère, constitué des Marnes du Kimméridgien. À l'échelle de l'aire d'étude éloignée, des traçages artificiels recensés indiquent, de manière conservative, les directions d'écoulement et l'extension vers le nord de l'aire potentielle d'influence. Ces traçages peuvent être regroupés en deux types en fonction de la localisation de leur point d'injection (cf. Figure 2-3) :

- l'injection a été réalisée à proximité immédiate de la zone des futures installations de surface du centre de stockage Cigéo ; ces traçages témoignent d'une connexion directe entre la zone des futures installations de surface et les points de sortie du traceur situés dans l'Orge, la Saulx et au niveau de la source de Rupt-aux-Nonains ;
- l'injection a été réalisée à plusieurs kilomètres en aval de la zone des futures installations de surface du centre de stockage Cigéo mais à l'intérieur de l'aire d'étude éloignée ; ces traçages informent sur les directions globales d'écoulement et les potentielles connexions indirectes (par l'intermédiaire du réseau hydrographique). Ces traçages indiquent des directions générales vers le nord-nord-ouest avec des exutoires identifiés au nord de Bar-Le-Duc pour les plus éloignés.

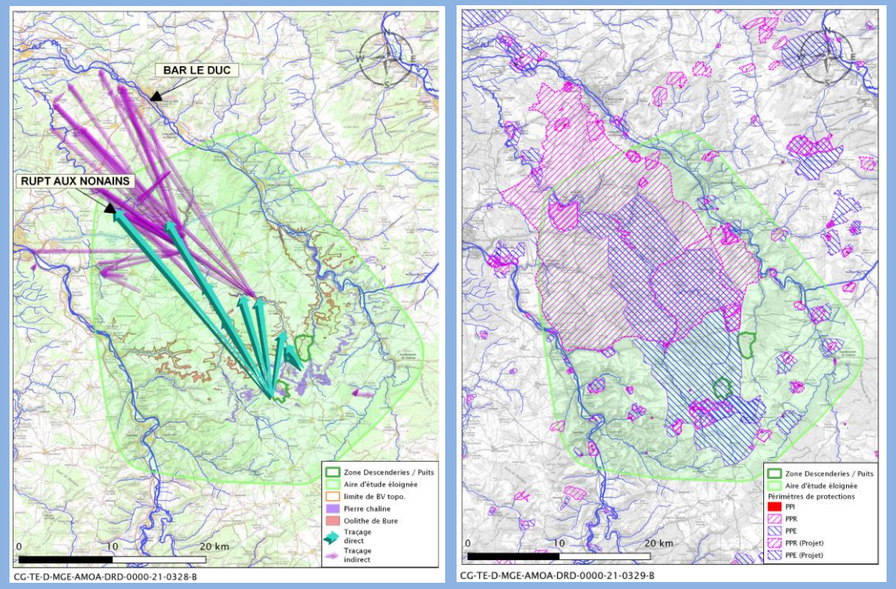


Figure 2-3 *À gauche : Traçages hydrogéologiques et directions globales des écoulements dans les Calcaires du Barrois depuis la zone descenderie ; à droite : protection réglementaire des captages AEP (PPI : périmètre de protection immédiat ; PPR : périmètre de protection rapproché ; PPR périmètre de protection éloigné) dans l'aire d'étude éloignée.*

L'ensemble des connaissances disponibles (acquises par l'Andra ou disponibles dans les bases de données publiques) permettent ainsi de tracer, de manière très sécuritaire, une enveloppe de l'aire d'influence hydraulique potentielle (cf. Figure 2-4) des installations de surface du centre de stockage Cigéo en prenant comme référence les directions d'écoulements ainsi que les exutoires naturels identifiés par les traçages.

On retiendra notamment qu'au niveau du captage AEP de Rupt-aux-Nonains qui correspond au point de restitution direct le plus au nord, on a pu établir, par traçage en période de basses eaux, **un facteur de dilution de l'ordre de 10^8**, cohérent avec l'extension de l'aire d'étude éloignée.

Dans l'hypothèse d'une connexion entre les installations de surface du centre de stockage Cigéo et les captages plus au nord que celui de Rupt-aux-Nonains, le facteur de dilution serait plus élevé. Cette hypothèse est cohérente avec la délimitation du réseau d'alerte et de secours défini dans l'arrêté n° 2020-2664 du 18 décembre 2020 portant déclaration d'utilité publique les travaux de dérivation des eaux souterraines des sources Mourot et de la Côte Géminel. En effet, ce dernier couvre le secteur du cours d'eau de la Saulx de Ménil-sur-Saulx à Trémont-sur-Saulx jusqu'aux sources, avec une limite sud-est s'arrêtant à une quinzaine de kilomètre en aval des installations du centre de stockage Cigéo.

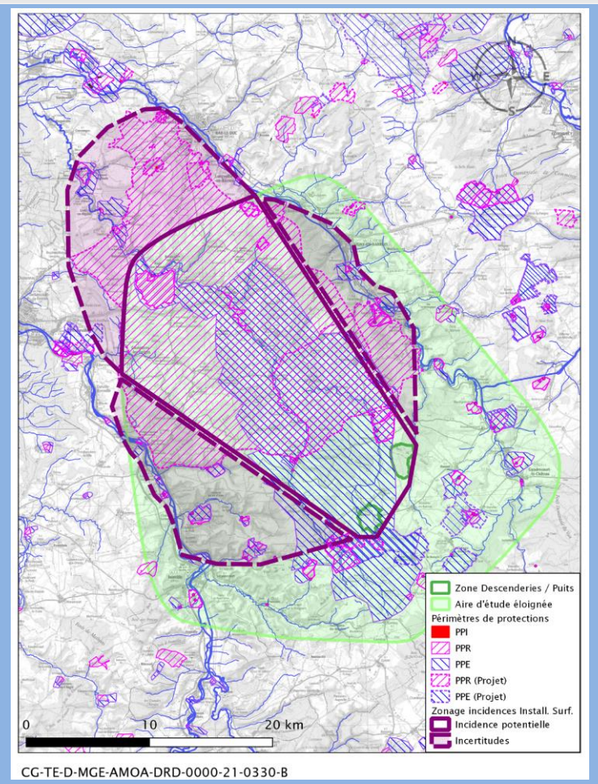


Figure 2-4 *Tracé de la zone potentielle d'incidence (et incertitudes associées en pointillés) des installations de surfaces ZD et ZP du projet Cigéo) sur les eaux souterraines des calcaires du Barrois*

Influence des liaisons surface - fond sur les eaux souterraines

Les liaisons surface-fond, telles qu'elles sont conçues à ce stade, sont étanches au niveau de la formation des Calcaires du Barrois et drainantes au niveau de l'Oxfordien, leur influence hydraulique potentielle ne s'exprimera qu'au niveau des Calcaires de l'Oxfordien, en générant un rabattement hydraulique, comme observé autour des deux puits du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Toutefois, du fait notamment des caractéristiques peu transmissives de l'Oxfordien au niveau de la zone de transposition (cf. Réponse à la recommandation R5), **cette perturbation hydraulique ne sera significative qu'à proximité immédiate des descenderies et des puits, quelques dizaines à centaines de mètres au plus. Elle ne modifierait pas le fonctionnement des captages AEP situés en dehors de la zone de transposition, à plusieurs kilomètres au sud-est des descenderies et des puits, notamment au niveau du fossé de Gondrecourt.**

2.1.1.4.2 Eaux de surface

Le projet Cigéo est établi en tête du bassin versant de la Marne et de la Seine, qui alimente en eau potable plus de dix millions d'habitants. Il est donc à l'amont d'un vaste bassin comprenant l'Île-de-France, la vallée de la Seine à l'aval de Paris et d'autres agglomérations de taille moyenne sur la Marne et l'Ornain. Il est peu éloigné des bassins de la Meuse (20 km), de la Moselle et du Rhin (40 km), voire de la Saône et du Rhône (60 km). L'aire d'étude éloignée s'insère dans les trois bassins versants principaux de la Marne, de la Saulx et ses affluents l'Orge et la Bureau, et de l'Ornain, incluant plusieurs affluents dont l'Ormancon. La position en tête de bassin explique les faibles débits observés. Les cours d'eau temporaires de l'Orge, de la Bureau et de l'Ormançon sont les plus proches du centre de stockage Cigéo.

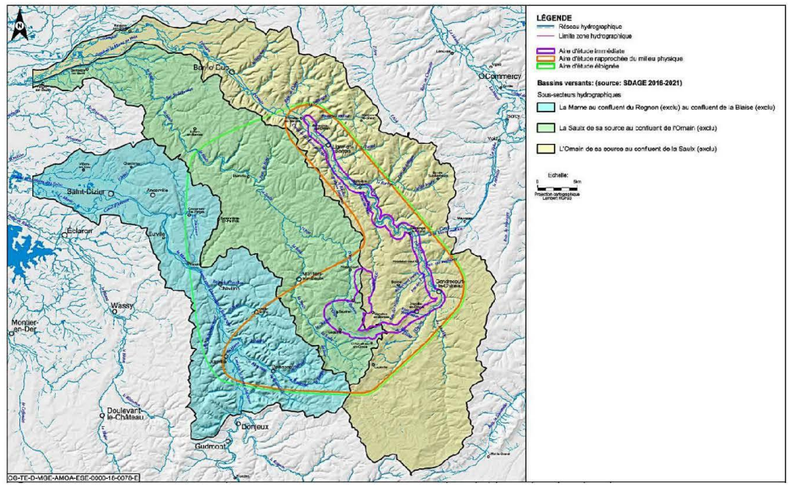


Figure 7 : Carte des sous-secteurs hydrographiques (source : Sandre, 2019, reprise dans le dossier)

L'ITE traverse ou longe des petits affluents de l'Ornain. La ligne ferroviaire 027000 longe la vallée de l'Ornain, cours d'eau pérenne, avec plusieurs franchissements de l'Ornain et de ses affluents. L'ITE passe à proximité des plans d'eau de Gillaumé et de La Ballastière sur la commune de Gondrecourt-le-Château. La ligne ferroviaire 027000 longe plusieurs plans d'eau.

Une ligne à 400 kV s'inscrit dans le bassin Seine-Normandie sur environ deux tiers de son tracé et recoupe celui de la Meuse sur son extrémité est. L'opération d'alimentation électrique au niveau du poste de transformation et le faisceau d'implantation des liaisons électriques enterrées se situe dans les bassins versants de l'Orge, de la Bureau et de l'Ormançon. Les travaux associés à l'opération d'adduction d'eau concernent les trois bassins versants principaux (Marne, Saulx et Ornain).

État chimique et écologique des cours d'eau

La qualité chimique des cours d'eau est variable selon les stations et l'année. L'état écologique des eaux superficielles de l'aire d'étude éloignée oscille entre « mauvais » et « bon » sur la période 2014-2017 avec une majorité de stations en état « moyen ». Les états chimiques et écologiques des

cours d'eau traversés par la ligne à 400 kV présentent un faciès allant de « bon » à « mauvais ». La Saulx et l'Ornain présentent une qualité chimique des eaux régulièrement dégradée depuis 2011 du fait notamment de la présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) à des concentrations supérieures à la NQE[26] et ponctuellement de quelques métaux dépassant les seuils. Leurs affluents, l'Orge et l'Ormancon, semblent plus préservés. Des pollutions plus ponctuelles ont été observées, liées à la présence de pesticides, le tributylétain et l'isoproturon.

Des déclassements réguliers dus à la présence de mercure dans les sédiments ont été mis en évidence. Les analyses révèlent également des dépassements de seuils en HAP (benzo(a)pyrène) dans les sédiments ainsi que d'autres polluants comme le plomb et l'arsenic.

L'état écologique de la Saulx est plus dégradé que celui des autres cours d'eau. Celui de l'Orge et de l'Ormancon est moyen. Les déclassements sont liés aux paramètres physico-chimiques classiques et notamment à ceux liés à l'oxygénation (O_2), aux teneurs en nutriments, ainsi qu'à la présence récurrente de certains herbicides.

Certains cours d'eau font l'objet d'un classement au regard de la continuité écologique (trame bleue)[27], dont deux (La Voire, La Héronne) dans l'aire d'étude spécifique de la ligne à 400 kV.

Risques d'inondation

L'aire d'étude éloignée du projet global Cigéo comprend trois plans de prévention des risques inondation (PPRi) : Marne moyenne ; vallées de la Saulx et de l'Orge ; secteurs amont et centre de l'Ornain. Aucune des installations du centre de stockage Cigéo n'est comprise dans leur périmètre. La ligne ferroviaire 027 000 traverse des zones inondables définies par le PPRi de l'Ornain à l'aval de Gondrecourt-le-Château mais reste hors d'eau pour la crue de référence.

Il n'y pas de territoire à risque important d'inondation (TRI) dans l'aire d'étude.

Enjeux

L'aire d'étude éloignée présente des cours d'eau à très faibles débits en interface étroite avec les eaux souterraines notamment au droit de l'affleurement des calcaires du Barrois. Seuls la Marne, la Saulx et l'Ornain sont pérennes. Très peu d'usages sont répertoriés pour les eaux superficielles, dont aucun pour l'AEP alors que les cours d'eau de cette tête de bassin desservent à l'aval des captages servant à l'alimentation en eau potable de dizaines de millions d'habitants. Du fait des très faibles débits, voire des périodes d'assec récurrentes, les petits cours d'eau présentent une sensibilité forte aux dégradations de leur qualité écologique ou chimique.

2.1.1.5 Milieux naturels terrestres

Le chapitre sur les milieux terrestres souligne la mosaïque d'habitats naturels de la région Grand-Est favorable à une forte richesse spécifique. Cette diversité biologique est, selon le dossier, en déclin dans la région et dans l'aire d'étude, du fait des activités anthropiques : « *intensification des pratiques agricoles, plantations d'essences exotiques, chasse et pêche de loisir, retournement de prairies* ».

[26] NQE : Norme de Qualité Environnementale
[27] Article L 214-17 du code de l'Environnement

2.1.1.5.1 Espaces protégés ou remarquables[28]

Les sites Natura 2000 sont traités dans le chapitre § 2.4 du présent avis. Les espaces naturels sensibles (ENS) sont au nombre de 60 dans l'aire d'étude éloignée dont 15 dans l'aire d'étude immédiate. On notera que la ligne ferroviaire ou son aire d'étude concernent huit ENS dont un couvre l'ensemble du parcours.

Le bois Lejuc, où sera implantée la zone puits, est intégré à la Znieff[29] « *Forêt de la fosse Lemaire à Mandres-en-Barrois* », le dossier minimise son importance du fait que « *c'est la richesse des observations disponibles, issue des inventaires réalisés par l'Andra, qui justifie le classement plutôt que la présence exceptionnelle d'espèces sur le site* ». Le dossier conclut que le projet « *est en grande majorité prévu sur les lieux où la biodiversité est ordinaire et où les espaces naturels n'ont pas de fonctionnalité écologique* ». L'Ae ne souscrit pas à cette interprétation ; le choix d'implanter la zone puits en forêt, qui plus est dans une Znieff, résulte d'un souci d'évitement des terres agricoles et ne peut pas être justifié par la biodiversité des espaces concernés.

2.1.1.5.2 Zones humides

La ligne électrique à 400 kV se situe en partie dans la zone humide d'importance internationale[30] des étangs de Champagne, notamment les étangs de la Horre, inscrits à l'inventaire des Znieff, classés site Natura 2000 et réserve naturelle nationale. Cette zone humide des étangs de Champagne de 225 000 ha est la plus étendue de France, elle accueille près de 200 000 oiseaux de 50 espèces en hivernage.

La détermination des zones humides a permis de repérer 5,9 ha d'habitats humides. La zone descenderie est concernée avec 5,1 ha de zones humides. La zone puits ne comporte pas de zone humide.

La ligne ferroviaire comporte plus de 196 ha de zones humides dans son aire d'étude immédiate. La déviation de la RD60/960 devra, quel que soit le tracé retenu par le Département, franchir des cours d'eau et *ipso facto* les zones humides qui les bordent. Enfin, il est mentionné que les tracés des canalisations d'adduction d'eau du projet et leur localisation ne sont pas encore définis et donc que les zones humides concernées seront identifiées ultérieurement. L'Ae considère que ces deux derniers points fragilisent le choix d'implantation des installations de surface qui ne peut en tenir compte pour identifier la prise en compte de l'environnement dans le choix parmi les options.

Le dossier conclut à un enjeu localement fort pour les zones humides.

2.1.1.5.3 Continuités écologiques

La Champagne humide est signalée comme un des supports privilégiés pour les échanges écologiques au niveau régional. À l'échelle du centre de stockage et de la ligne ferroviaire, quatre corridors écologiques principaux sont à considérer :

[28] Voir également le chapitre § 2.4 Évalution des incidences Natura 2000.

[29] Lancé en 1982 à l'initiative du ministère chargé de l'environnement, l'inventaire des zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (Znieff) a pour objectif d'identifier et de décrire des secteurs présentant de fortes capacités biologiques et un bon état de conservation. On distingue deux types de Znieff : les Znieff de type I : secteurs de grand intérêt biologique ou écologique ; les Znieff de type II : grands ensembles naturels riches et peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes.

[30] Dite zone Ramsar du fait de la convention relative aux zones humides d'importance internationale adoptée le 2 février 1971 à Ramsar en Iran

- le corridor herbacé et humide de la vallée de l'Ornain qui longe la ligne ferroviaire ;
- le corridor forestier au nord du bois Lejuc ;
- le corridor forestier de la forêt de Veau au sud-est de la vallée de l'Ornain
- le corridor aquatique et humide de la vallée de l'Ormançon.

Le tracé de la ligne à 400 kV interfère avec plusieurs corridors forestiers, humides et aquatiques. Le dossier indique que le corridor constitué par le bois Lejuc, fréquenté par les mammifères de taille moyenne à grande (Putois d'Europe, Chat sauvage et Cerf élaphe) présente une connectivité qui tend à se réduire du fait de la disparition d'éléments paysagers. Les corridors concernés par les canalisations d'adduction d'eau et le poste de transformation qui relie le site à la ligne à 400 kV ne sont pas identifiés, ces composantes du projet n'étant pas encore définies avec précision. Comme pour les zones humides (cf. § 2.1.1.6.2) ce point fragilise la prise en compte de l'environnement dans le choix parmi les options.

L'Ae recommande d'approfondir les possibilités de tracés pour la déviation de la route départementale 60/960, les canalisations d'adduction d'eau et le poste de transformation électrique du futur site afin de prendre en compte à un niveau approprié les enjeux relatifs aux zones humides et aux corridors de biodiversité dans le choix de la solution retenue pour l'implantation des installations de surface du centre de stockage.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R7

L'Andra prend acte de cette recommandation. Les enjeux globaux relatifs aux zones humides et aux corridors de biodiversité dans le choix de la solution retenue pour l'implantation des installations de surface du centre de stockage ont été appréhendés sur l'ensemble des zones accueillant des variantes d'implantation des opérations des autres maîtres d'ouvrages. Un approfondissement de l'état actuel de l'environnement autour des opérations menées par les autres maîtres d'ouvrage est une démarche itérative normale et est d'ores et déjà engagée afin de consolider la bonne prise en compte de ces enjeux.

Les différentes opérations composant le projet global Cigéo, et en particulier celles sous la responsabilité de maîtres d'ouvrage autres que l'Andra, n'ont pas toutes le même avancement en termes d'étude et de concertation, ce qui a des conséquences sur leur niveau d'analyse dans la présente version de l'étude d'impact.

Afin de prendre en compte au meilleur niveau les enjeux environnementaux, l'Andra a fait le choix de piloter toutes les études écologiques pour l'ensemble des opérations du projet global Cigéo en s'appuyant sur des bureaux d'études ou des associations spécialisées (cf. Volume VII de la pièce 6, Étude d'impact). Ainsi les protocoles appliqués à ces relevés et les pressions d'inventaires (nombre de passage et périodes d'observation) sont identiques pour toutes les opérations composant le projet global Cigéo selon une démarche progressive et appropriée reposant sur :

- les données bibliographiques, des analyses des grandes formations phytosociologiques, les zones humides potentielles et les corridors écologiques de la Trame Verte et Bleue ;
- des inventaires de terrain par groupes d'espèces comprenant également des localisations des zones humides et des corridors écologiques avérés dans des fuseaux d'implantation de tracés potentiels Ces résultats d'inventaire contribuent à la comparaison des incidences des différentes variantes et solutions de substitution ;
- des inventaires faunistiques et floristiques détaillés menés à une fréquence minimale de trois ans dans la zone susceptible d'être affectée.

Cette démarche permet de prendre en compte à un niveau suffisant les enjeux relatifs aux zones humides et aux corridors de biodiversité dès le stade du dossier d'enquête publique préalable à la DUP.

Pour le centre de stockage Cigéo, qui constitue le périmètre concerné par le présent dossier de demande de déclaration d'utilité publique, l'ensemble des installations objet du présent dossier a fait l'objet des investigations plus poussées. La prise en compte des données bibliographiques décrivant le secteur a été complétée par de nombreux inventaires de terrains. Ces inventaires sont régulièrement mis à jour afin d'alimenter les dossiers d'autorisation ultérieurs en données d'observation de moins de trois ans.

Pour les travaux des autres maitres d'ouvrage composant le projet global :

- les travaux de sécurisation de la ligne 400 kV et la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 ne sont définis que par le linéaire des réseaux existants concernés. Les modalités d'intervention sur les pylônes de la ligne électrique ainsi que les modalités de réfection des ouvrages d'art et des passages à niveau le long de la ligne ferroviaire 027000 n'ont pas encore été toutes arrêtées par leurs maîtres d'ouvrage respectifs. Ainsi, les éléments d'état actuel proposés sont principalement bibliographiques. Ils sont accompagnés de premiers repérages de terrains et d'estimations techniques. Ils permettent l'arbitrage entre les principaux enjeux environnementaux afin de choisir les solutions techniquement et financièrement envisageables offrant le moindre impact environnemental pour préciser les modalités d'interventions. Seules des incidences potentielles sont évaluées de manière à proposer les mesures couramment mises en œuvre pour ces types de travaux et les engagements nécessaires à la préservation des principaux enjeux environnementaux ;
- les travaux de construction du poste de transformation électrique et les lignes électriques enterrées ainsi que la déviation de la route départementale D60/960 sont au stade de l'analyse des variantes. Ainsi, plusieurs éventualités d'implantations sont présentées. Des analyses bibliographiques et des premiers inventaires de terrains nourrissent la description de l'état actuel des secteurs concernés par les variantes en cours d'étude ;
- l'opération d'adduction d'eau n'est définie que par des objectifs fonctionnels. Les points de départs et d'arrivées sont connus, mais le trajet reste à définir. Le tracé des canalisations sera conçu en évitant les principaux enjeux environnementaux et en réduisant les incidences n'ayant pas pu être évitées, compensant les éventuels impacts résiduels.

À la date de rédaction du présent mémoire, l'état d'avancement des relevés de terrain en ce qui concerne les enjeux relatifs aux zones humides et aux corridors écologiques diffère selon l'état d'avancement des opérations :

- pour l'alimentation électrique :
  - ✓ les relevés sont en cours sur les six variantes d'implantation du poste de transformation électrique ; ils seront actualisés à une fréquence permettant d'alimenter les dossiers successifs en données naturalistes de moins de trois ans ;
  - ✓ au niveau de la ligne 400 kV existante à sécuriser, des relevés de terrain ont été réalisés au niveau des sites Natura 2000 jugés les plus sensibles (cf. Chapitre 6.11 du volume III de l'étude d'impact). Des relevés écologiques complémentaires seront réalisés sur les zones potentiellement impactées sur l'ensemble du tracé, en tenant compte de la nature et de la durée des interventions sur les pylônes ainsi que de la nécessité de création d'accès provisoires.
- pour l'adduction d'eau, les relevés vont être engagés dès l'identification de fuseaux de variantes d'implantation des canalisations. Ces variantes sont recherchées préférentiellement le long des tracés des routes existantes pour limiter les incidences de ces travaux sur le milieu naturel ;
- pour la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000, les relevés sont achevés (cf. Chapitre 6.13 du volume III de l'étude d'impact) et ils seront actualisés à une fréquence permettant d'alimenter les dossiers successifs en données naturalistes de moins de trois ans ;
- pour la déviation de la route départementale D60/960, les relevés sont en cours sur les trois options de la déviation et ils seront actualisées en fonction de la fréquence d'inventaires précisé précédemment.

Le bois Lejuc est un corridor identifié par le schéma régional de cohérence écologique du Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'équilibre des territoires (Sraddet) pour sa partie nord qui ne sera occupée que si aucune solution n'est trouvée pour la valorisation des verses. Pour la Dreal : « *Le corridor biologique des milieux boisés figurant sur la carte 6-2-2 est théorique et sa représentation est schématique. On ne peut en conclure que seuls les aménagements franchissant la limite de ce corridor schématique auront une incidence sur la continuité écologique. En l'occurrence, la destruction du Bois Lejuc aura inévitablement un impact sur la fonctionnalité de ce corridor et du réservoir de biodiversité que représente le boisement* ». Le niveau d'enjeu modéré proposé par le dossier concernant les continuités écologiques apparaît pour l'Ae sous-estimé, notamment pour le bois Lejuc. Il conviendrait de le remonter au niveau moyen, et fort localement pour le bois Lejuc.

L'Ae recommande également d'assigner à la continuité écologique un niveau d'enjeu moyen, et fort pour le bois Lejuc.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R8

L'Andra prend acte de cette recommandation. Les fonctionnalités écologiques du corridor lié au bois Lejuc ont été prises en compte aux niveaux d'enjeux recommandés par l'Ae pour la définition des mesures d'évitement et de réduction figurant aux chapitre 6.3.1 et 6.3.2 du volume IV de l'étude d'impact.

Le schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) de la région Grand Est, est aujourd'hui l'outil de mise en œuvre de la Trame Verte et Bleue à l'échelle régionale. Il identifie les continuités écologiques (réservoirs de biodiversité et corridors écologiques) à préserver ou à remettre en bon état, qu'elles soient terrestres (trame verte) ou aquatiques et humides (trame bleue) pour, entre autres, favoriser le déplacement des espèces et réduire la fragmentation des habitats. Les corridors écologiques assurent des connexions entre des réservoirs de biodiversité, offrant aux espèces des conditions favorables à leurs déplacements.

Le SRADDET identifie un corridor écologique à enjeu régional pour les espèces des milieux boisés reliant la ZNIEFF de type I « *Gites à chiroptères de Montiers-sur-Saulx et Forêt de Morley* » situé l'ouest des composantes du centre de stockage Cigéo et le site Natura 2000 « *Bois de Demange, Saint-Joire* » situé au nord du bois Lejuc (cf. Figure 2-5). Ce corridor traverse la vallée de l'Orge et permet de connecter le bois Lejuc et la forêt de Grammont, distants d'environ 1,5 km (cf. Chapitre 6.6.2.1 du volume III de l'étude d'impact).

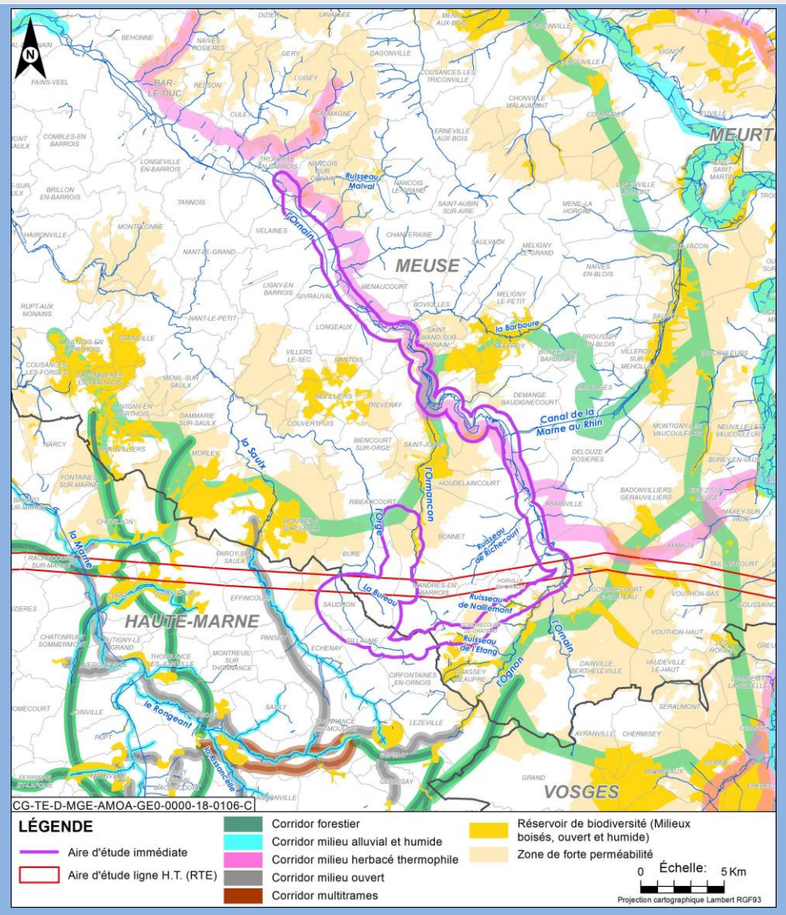


Figure 2-5 *Carte des corridors écologiques identifiés dans le SRADDET*

Au regard des différentes sessions d'inventaires réalisées entre les deux boisements, il s'avère que les continuités écologiques sont assurées par plusieurs bosquets et linéaires de haies relativement dispersés et qu'aucun corridor continu n'existe (cf. Figure 2-6). Par ailleurs, la vallée de l'Orge est dominée par les cultures et les prairies qui représentent, avec le cours d'eau, une rupture des continuités écologiques boisées. La traversée de ces milieux ouverts représente un coût relativement important pour les espèces inféodées aux milieux boisés en particulier pour les espèces ayant une capacité de déplacement limitée comme les reptiles. À noter également que la route départementale D127 est un élément fragmentant également ce corridor au niveau local.

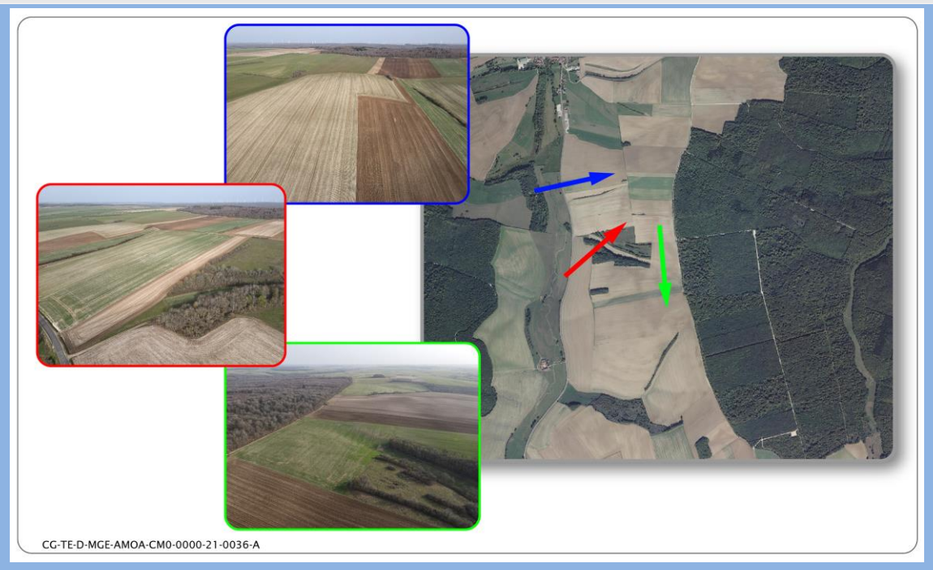


Figure 2-6 *Photographies réalisées par drone du corridor écologique défini dans le SRADDET entre le Bois Lejuc et la forêt de Montier (Andra - 2021)*

Aussi, au regard de ces éléments, un enjeu moyen (équivalent à modéré selon la méthodologie retenue dans l'étude d'impact pour l'évaluation des enjeux) peut être attribué à cette portion de continuité régionale. Ce niveau d'enjeu local est du même niveau que les continuités écologiques locales et régionales évaluées à l'échelle du projet global (hors alimentation électrique) au chapitre 6.6.2 du volume III de l'étude d'impact.

Concernant le bois Lejuc, l'analyse des enjeux écologiques de l'étude d'impact met en avant un niveau d'enjeu globalement fort à l'échelle de l'ensemble du boisement, eu égard aux intérêts des habitats pour les chiroptères, les mammifères terrestres et l'avifaune (cf. Chapitre 6.9.3 du volume III de l'étude d'impact). Au sein de la Trame Verte et Bleue, le bois Lejuc est un réservoir de biodiversité, tel que défini dans le SRADDET, du fait de son récent classement en ZNIEFF I. Les zones de transit au sein même du bois Lejuc se concentrent essentiellement au niveau des lisières et, dans une moindre mesure, au niveau des traverses forestières en particulier pour les chiroptères qui les utilisent comme zone de chasse (cf. Chapitre 6.6.2.3 du volume III de l'étude d'impact). D'autre part, il convient de préciser que moins de 10 % de la surface totale du massif boisé sera concerné en termes d'emprise nécessaire pour l'implantation de la zone puits à terminaison.

2.1.1.5.4 Habitats naturels, faune et flore

Zone descenderie et liaison intersites

Les habitats naturels ou semi-naturels de cette zone sont à 80 % des espaces agricoles, il subsiste cependant cinq habitats naturels d'intérêt communautaire dont les saussaies de plaine, les forêts galeries de Saule blanc et les forêts de frênes et d'aulnes des ruisselets et des sources, situés près des cours d'eau et considérés comme d'enjeu écologique fort. La vallée de l'Orge constitue un habitat naturel d'intérêt fort pour les amphibiens. Il n'a pas été repéré d'espèce floristique protégée mais plusieurs espèces patrimoniales dont la Petite Spéculaire à enjeu très fort et le Miroir de Vénus à enjeu fort.

Zone puits

La zone puits est située dans son intégralité en forêt. Parmi les 15 habitats naturels ou semi-naturels répertoriés, deux sont d'intérêt communautaire : la hêtraie à Mélique et la chênaie-charmaie à Stellaire subatlantique. L'étude d'impact considère que les enjeux de ces habitats sont moyens.

Installation terminale embranchée

Parmi les 60 habitats naturels ou semi-naturels recensés dans cette zone, neuf sont d'intérêt communautaire dont deux prioritaires : les pelouses calcaires subatlantiques semi-arides et les forêts de frênes et d'aulnes rivulaires et considérées comme d'enjeu écologique fort.

Postes de transformation et leurs raccordements électriques

Les grandes cultures constituent l'occupation majeure du sol ; seuls deux habitats naturels, – prairie de fauche de basse altitude et hêtraie à Mélique en lisière du bois Lejuc, présentent des enjeux.

L'Ae observe que les recensements de flore et de faune sont moins approfondis, notamment en ce qui concerne le recensement des espèces et habitats, pour ce qui concerne la ligne électrique et les postes de transformation que pour les autres zones du projet. L'enjeu est considéré comme modéré sans qu'on puisse identifier s'il s'agit d'une conséquence du moindre approfondissement des études.

L'Ae recommande d'approfondir les analyses de la flore et la faune de la zone des postes de transformation et de leurs raccordements électriques et de requalifier le cas échéant l'enjeu qui leur a été attribué.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R9

L'Andra prend acte de cette recommandation. Les analyses faune-flore présentées dans le dossier ont permis une qualification pertinente de l'enjeu de ces zones. Les données complémentaires acquises dans le cadre du process itératif viendront affiner cette analyse des enjeux et la définition des mesures de la séquence ERC appliquées à ces opérations. Cette analyse détaillée sera présentée dans les dossiers de demande d'autorisation associés à cette opération de raccordement électrique.

Comme évoqué au chapitre 6.1.2.2 du volume VII de l'étude d'impact, des premiers inventaires écologiques ont été réalisés dans le but de dégager les principaux enjeux sur les potentiels sites d'implantation du poste de transformation et des raccordements électriques reliant le poste de transformation aux zones puits et descenderie.

Comme précisé au chapitre du présent mémoire relatif à la recommandation R7, les relevés écologiques approfondis sur une aire d'étude intégrant la zone des six variantes d'implantation du poste de transformation et de leurs raccordements électriques enterrés sont en cours. Ces relevés sont réalisés avec une pression d'inventaire appropriée et homogène sur l'ensemble de l'aire d'étude immédiate du projet de centre de stockage Cigéo.

Ligne électrique à 400 kV

Trois zones sensibles qui sont également des sites du réseau Natura 2000 ont été ciblées pour les investigations écologiques le long de la ligne électrique : l'étang de la Horre, la forêt de Gondrecourt-le-Château et la vallée de la Meuse. L'état des lieux apparaît insuffisant : l'état actuel de l'environnement au niveau de la ligne électrique est lacunaire et l'absence d'association du Conservatoire des espaces naturels de Champagne-Ardenne, en qualité de gestionnaire de la réserve naturelle nationale de l'étang de la Horre est regrettable.

L'Ae recommande de compléter l'inventaire de la biodiversité de la ligne électrique et d'y associer le Conservatoire des espaces naturels de Champagne-Ardenne, gestionnaire de la réserve naturelle nationale de l'étang de la Horre.

ÉLÉMENTS DE RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R10

L'Andra prend acte de cette recommandation et confirme la mise à jour du dossier par des inventaires spécifiques sur la biodiversité au droit des pylônes de la ligne électrique sous maitrise d'ouvrage RTE existants et implantées dans une zone Natura 2000. Des approfondissements dans les dossiers ultérieurs sont prévus.

Comme précisé au chapitre relatif à la recommandation R7 du présent mémoire, des relevés de terrain ont été réalisés au niveau des sites Natura 2000 considérés dans la méthodologie retenue (cf. Chapitre 6.11 du volume III de l'étude d'impact). Des relevés écologiques complémentaires sont prévus d'être réalisés sur les zones potentiellement impactées sur l'ensemble du tracé, en tenant compte de la nature et de la durée des interventions sur les pylônes ainsi que de la nécessité de création d'accès provisoires.

D'autre part, des contacts ont été pris au premier trimestre 2021 par RTE auprès du Conservatoire des espaces naturels de Champagne-Ardenne afin de procéder à un éventuel partage de données et de recueillir leur avis sur la pertinence des mesures d'évitement et de réduction envisagées en faveur de la biodiversité.

La réserve naturelle nationale (un seul pylône concerné) est incluse dans les deux sites Natura 2000 de l'étang de la Horre (cf. Figure 2-7 ci-dessous). **L'évaluation des incidences sur les sites Natura 2000 par le projet global Cigéo** (cf. Volume V de l'étude d'impact) **a été complétée** (cf. Chapitre relatif à la prise en compte de la recommandation R34) **afin d'intégrer des précisions relatives à la nature des travaux de sécurisation de la ligne électrique 400 kV au droit des deux zones Natura 2000 mais aussi d'observations naturalistes réalisées au niveau des pylônes.**

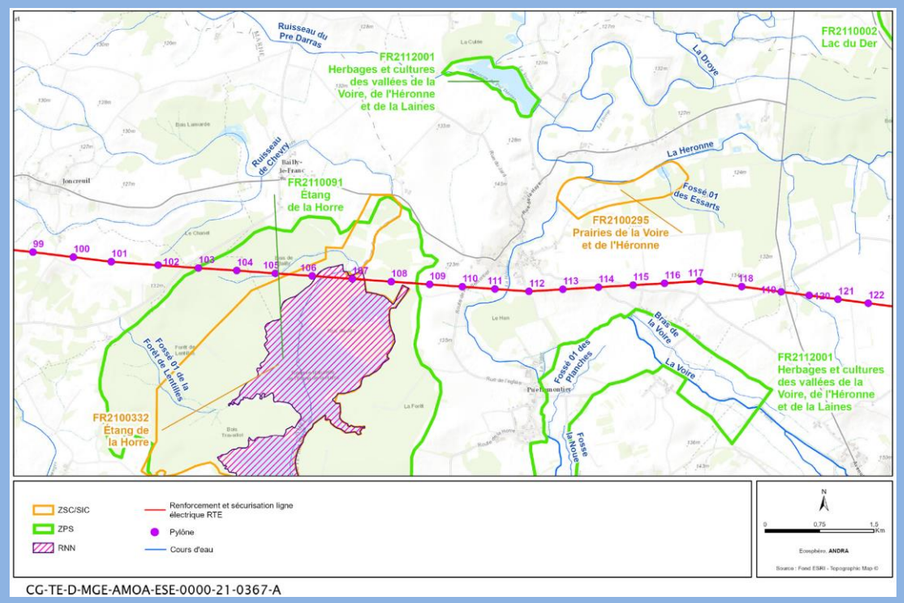


Figure 2-7 *Localisation des pylônes au sein des sites Natura 2000 de l'étang de la Horre et de la Réserve Naturelle Nationale (RNN)*

Zone de captage et d'adduction d'eau

Cette partie du projet n'est pas encore précisée ; seules des études bibliographiques ont été réalisées. Il sera donc nécessaire de procéder à ces analyses et de les mettre à profit pour nourrir la comparaison des avantages et inconvénients des différentes solutions à examiner au regard de leurs incidences sur l'environnement.

L'Ae recommande de procéder sans tarder à l'établissement de l'état actuel de la biodiversité sur les sites envisagés pour la mise en place du système d'adduction d'eau du centre Cigéo.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R11

L'Andra prend acte de cette recommandation et indique que les enjeux globaux relatifs à la biodiversité sur les sites envisagés ont été appréhendés dans le présent dossier. Lors du choix des variantes d'implantations, une évaluation plus précise des incidences résiduelles de l'opération, après application des mesures de la séquence ERC, sera présentée dans les dossiers d'autorisation relatifs à cette opération d'adduction d'eau.

Les opérations d'adduction d'eau ne sont à ce stade définies que par des objectifs fonctionnels. Les points de départs et d'arrivées sont connus, mais le trajet reste à définir. Les relevés écologiques sont en cours selon un projet de fuseaux de variantes d'implantation des canalisations d'environ 1 kilomètre de large. Ces relevés sont réalisés avec une pression d'inventaire suffisante et homogène sur l'ensemble de l'aire d'étude immédiate du projet global. Ces inventaires viendront alimenter l'analyse multicritères qui permettra de retenir le meilleur tracé au regard des impacts environnementaux, des différentes contraintes techniques et des éventuelles opportunités de raccordement pour le territoire.

À noter que les relevés seront actualisés à une fréquence permettant d'alimenter les dossiers successifs en données naturalistes de moins de trois ans.

Ligne ferroviaire

L'aire d'étude immédiate de la ligne ferroviaire comporte 1 000 ha de cultures et 89 ha d'habitats semi-naturels ou naturels. Les habitats naturels d'intérêt communautaire couvrent 20 % de la surface. Le dossier en liste huit présentant des enjeux forts et souligne que pour l'essentiel de ces habitats, leur état de conservation est globalement moyen. Les enjeux pour les espèces et habitats naturels sont jugés comme forts.

Déviation de la route départementale D60/960

Le dossier indique que l'étude des variantes de cette liaison est en cours et que des investigations approfondies seront mises en place lors de l'actualisation de l'étude d'impact. L'Ae considère que des études suffisamment précises pour instruire le choix d'implantation des installations et des ouvrages qui les relient doivent précéder l'examen des variantes.

L'Ae recommande de procéder à l'évaluation de l'état actuel de la biodiversité des variantes de la future emprise des zones traversées par la déviation de la route départementale D60/960 avant le choix de la variante à retenir.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R12

L'Andra prend acte de cette recommandation et indique que les enjeux globaux relatifs à la biodiversité des variantes ont déjà été appréhendés dans le présent dossier. Lors du choix de l'option de la déviation de la route départementale D60/960 après concertation préalable, une évaluation plus précise des incidences résiduelles de l'opération, après application des mesures de la séquence ERC, sera présentée dans les dossiers d'autorisation relatifs à cette opération de déviation de la route départementale D60/960.

Comme précisé au chapitre relatif à la recommandation R7, l'opération de déviation de la route départementale D60/960 est au stade de l'analyse des variantes. Ainsi, plusieurs éventualités d'implantations sont présentées. Des analyses bibliographiques et des premiers inventaires de terrains nourrissent la description de l'état actuel des secteurs concernés par les variantes en cours d'étude.

Les relevés complémentaires sont en cours sur les trois options de la déviation et ils seront actualisés à une fréquence minimale de trois ans. Ces relevés viendront éclairer les Conseils Départementaux et le public sur les incidences environnementales des différentes variantes.

2.1.1.6 État radiologique du milieu naturel

La présence de radionucléides a été mesurée sur plusieurs compartiments biologiques bio-indicateurs[31]. Les résultats montrent un niveau de radioactivité principalement d'origine naturelle (cf. figure 8). Ce niveau de radioactivité est conforme à ce qui est attendu sur un site situé à distance des sites industriels nucléaires. Le dossier ne fournit cependant pas de carte de localisation des valeurs mesurées.

» RÉPONSE DE L'ANDRA AU QUESTIONNEMENT DE L'AE

La carte de localisation des valeurs mesurées est dans le chapitre 17.1 du volume VII de l'étude d'impact correspondant aux méthodes utilisées (cf. Figure 17-1 Localisation des points de prélèvement des échantillons pour les mesures de la radioactivité).

Origine	Éléments radioactifs	Valeurs mesurées Min	Valeurs mesurées Max	Unité	Produits
Naturelle	^{40}K	89	790	Bq/kg sec	Mousse terrestre
		67	858	Bq/kg sec	Produits forestiers
	^{7}Be	53	1 300	Bq/kg sec	Mousse terrestre
	^{14}C	237	243	Bq/kg sec	Feuille d'arbre
	^{3}H	0,9	1,7	Bq/kg sec	Feuille d'arbre
	^{210}Po	8,7	29,5	Bq/kg sec	Herbe
Artificielle	^{137}Cs	2	300	Bq/kg sec	Mousse terrestre
		20	39	Bq/kg sec	Champignon
		0,2	2,1	Bq/kg sec	Gibier
		0,05	0,1	Bq/kg sec	Baie
	^{90}Sr	0,63	1,25	Bq/kg sec	Herbe

Figure 8 : Mesures de radioactivité dans les bio-indicateurs. Source dossier.

[31] Un bioindicateur, s'orthographiant aussi bio-indicateur, est un indicateur constitué par une espèce végétale, fongique ou animale ou par un groupe d'espèces (groupe éco-sociologique) ou groupement végétal dont la présence ou l'état renseigne sur certaines caractéristiques écologiques (c'est-à-dire physico-chimiques, pédologiques, microclimatiques, biologiques ou fonctionnelles) de l'environnement ou sur l'incidence de certaines pratiques. Source Wikipédia.

2.1.2 Milieu humain

2.1.2.1 Population et économie

Le dossier présente des données économiques et démographiques issues du Sraddet du Grand-Est : « *Le territoire d'implantation de Cigéo est à dominante rurale, constitué d'importantes surfaces agricoles. Il est marqué par une faible densité de population et des zones artificialisées marginales.* » La population proche du site du projet est de 36 000 habitants avec une densité de 21 habitants par km². 92 % des communes ont une population inférieure à 1 000 habitants. La population dans un rayon de 20 km autour du projet baisse de 0,6 % par an depuis 1968. Le nombre d'emplois est en baisse de 1 % par an depuis 2010. Si l'évolution démographique actuelle se poursuivait, le nombre de personnes en âge de travailler diminuerait de 19 %, soit de 8 000 personnes, à l'horizon 2030.

2.1.2.2 Agriculture, sylviculture et alimentation

L'emploi agricole représente 15 % des actifs, en diminution de 45 % en cinq ans. Les exploitations sont de type « grande culture » (blé, colza, orge) sur 82 % des surfaces. Plus de 300 ha ont été acquis par l'Andra et la Safer[32]. Les forêts occupent 45 % de l'aire d'étude rapprochée notamment le bois Lejuc qui sera en partie défriché pour installer la zone puits et le bois Le Marquis qui sera occupé par le dépôt des verses. L'emprise sur ces deux boisements sera d'environ 250 ha, il s'agit d'après le dossier de peuplements forestiers de type gaulis, perchis[33] et futaie pauvre sur taillis « *ne présentant pas une valeur marchande particulière* ». La ligne électrique à 400 kV traverse l'espace boisé classé de la forêt domaniale de Saint-Armand, à Favières.

Le dossier présente les résultats d'analyse de la présence de radionucléides dans l'alimentation et les feuilles des arbres. Les valeurs sont inférieures ou comparables aux moyennes nationales. Elles sont en majorité d'origine naturelle. Les quelques radionucléides d'origine artificielle présents sont issus des retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais atmosphériques d'armes nucléaires après la Seconde guerre mondiale.

L'analyse des polluants métalliques et des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les denrées alimentaires produites localement ne montre pas de dépassement des valeurs réglementaires sauf deux échantillons de blé et de colza qui ont présenté en 2009 des teneurs en plomb légèrement plus élevées que les normes.

2.1.2.3 Services écosystémiques

Le dossier présente une analyse de l'état actuel des services écosystémiques rendus par le territoire. La notion de service écologique a été popularisée par l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire[34] lancée par l'Organisation des Nations-Unies en 2000, qui affirme que : « *Chacun dépend de la nature et des services écologiques (fournis par les écosystèmes) pour accéder à une vie décente, sûre et en bonne santé.* » Cette approche anthropocentrée, si elle ne se substitue pas à l'impératif de protection de la nature pour elle-même, a l'intérêt d'ouvrir la possibilité d'intégrer au volet économique la perte ou le gain d'aménités environnementales du fait du projet.

[32] Société d'aménagement foncier et d'établissement rural.

[33] Les gaulis et perchis sont des peuplements âgés de 20 à 30 ans et de hauteur 10 à 15 m. Une futaie est composée d'arbres provenant uniquement d'un ensemencement sur place, les taillis sont des peuplements forestiers formés de rejets dont la régénération s'obtient par des coupes de rajeunissement. Source dossier.

[34] Synthèses des résultats de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire.

Le dossier prend en considération 25 services écosystémiques identifiés par un groupe de bureaux d'études parmi 43 à l'échelle nationale. Il n'est pas précisé ce qui a justifié le choix de ces services. La référence incluse dans le texte est absente de la liste bibliographique. Des cartes présentent les services rendus par plusieurs types d'« écosystème » : forêts, prairies, terres cultivées, écosystèmes urbains, milieux aquatiques, mais l'étude d'impact ne fournit aucune quantification des surfaces concernées.

L'Ae recommande de justifier les services retenus pour l'évaluation des services écologiques et de quantifier les surfaces des écosystèmes présents localement concernées par chacun de ces services.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R13

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour son dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants.

La méthode utilisée pour déterminer les services écosystémiques est présentée dans le volume VII chapitre 16.1.1.3 Caractérisation des services écosystémiques. Elle est explicitée ci-dessous pour faciliter la compréhension des arbitrages qui ont présidé à la sélection des services écosystémiques retenus sur le territoire du projet global Cigéo.

Au début des années 2000, les démarches d'évaluation des services écosystémiques ont commencé à être menées au niveau international sous l'égide de l'ONU (Millenium Ecosystem Assessment, MEA, 2005), puis la démarche s'est développée avec la création en 2012 de la plate-forme intergouvernementale sur la biodiversité et des services écosystémiques (IPBES) et la constitution au niveau européen du groupe de travail « Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services » (MAES, 2013) de la commission européenne. La France a également initié en 2012 une démarche nationale d'évaluation en appui à la décision publique via le programme EFESE (Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques).

Dans un premier temps, une recherche a permis de compiler les nombreux services écosystémiques cités dans les rapports et publications scientifiques notamment internationaux (MAES, IPBES, FAO...) : par exemple, 90 classes de services écosystémiques sont identifiées dans la classification CICES v5.1. L'évaluation Française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) nomme environ 40 services écosystémiques à l'échelle de la France métropolitaine. Ces listes, en particulier celle de l'EFESE, servent de base à l'analyse présentée dans le volume VII qui a conduit à une première liste, en excluant notamment les services rendus par les écosystèmes marins/littoraux (par exemple la production d'algues, le tourisme fluviatile...) et de montagne qui par nature ne sont pas présents sur la zone d'implantation du projet global Cigéo.

Dans un deuxième temps, cette première liste a été simplifiée en regroupant sous un même intitulé des services relevant des mêmes types d'usage. Par exemple, les services de production de bien végétaux à partir des plantes cultivées et à partir de surface en herbe, tous deux concernés par un usage agricole des sols, ont été regroupés sous l'intitulé production de cultures et de fourrage. Certains services comme l'atténuation naturelle des pesticides dans les sols ont été englobés sous l'intitulé régulation de la qualité des sols. Cette étape de simplification a permis d'établir la liste des 25 services écosystémiques présentés dans l'étude d'impact.

Chacun des 25 services écosystémiques sélectionnés a ensuite été individuellement confronté aux différents écosystèmes présents sur le territoire d'implantation du projet Cigéo en réalisant une matrice de service (Burkhard et al, 2009). Cette matrice est construite en intégrant, en colonnes, les 25 services écosystémiques identifiés et, en lignes, les cinq écosystèmes identifiés comme présents sur l'aire d'étude éloignée des interactions. Cette aire d'étude correspond à un cercle de 30 km de rayon centré sur la zone puits du centre de stockage Cigéo et qui intègre l'ensemble des opérations du projet global Cigéo. Aux intersections des lignes et colonnes, la case est grisée lorsque l'on considère que l'écosystème est en mesure de rendre le service. Cette matrice permet de manière conceptuelle et basée sur une expertise technique de lier les capacités des différents types d'écosystèmes à fournir les 25 services écosystémiques pré-sélectionnés.

Afin d'évaluer l'importance de chacun de ces 25 services écosystémiques au sein de l'aire d'étude éloignée, une première approche quantitative sur la base de l'occupation du sol a été réalisée. Cette analyse a conclu que chacun des 25 services écosystémiques est potentiellement fourni par au moins un type d'écosystème présent sur le territoire d'implantation du projet global Cigéo. Les surfaces des écosystèmes, correspondant chacun à un type d'occupation de sol, fournissant les services écosystémiques sur l'aire d'étude éloignée peuvent être calculées sous système d'information géographique (SIG) à partir des données surfaciques du Corine Land Cover (2018) (cf. Tableau 2-3). Le SIG mesure au sein de l'aire d'étude éloignée les surfaces des différentes occupations du sol associées aux services écosystémiques. Ainsi, comme explicité au chapitre 16.1 du volume III de la pièce 6, les services écosystémiques les plus présents dans l'aire d'étude éloignée des interactions sont les milieux forestiers (43 %) et les terres cultivées (41 %).

*Tableau 2-3 Superficie des différents écosystèmes présents dans l'aire d'étude éloignée (Source : Corine Land Cover 2018 (CLC 2018)**

Écosystèmes	Superficie (km²) CLC 2018	% de la superficie totale
Milieux urbains et autres milieux artificialisés	65	2
Terres cultivées	1167	41
Prairies	367	13
Milieux forestiers	1231	43

** Les données surfaciques de CLC 2018 ne distinguent pas les zones humides, c'est pourquoi elles n'apparaissent pas dans ce tableau.*

2.1.2.4 Réseaux

Le dossier présente de façon exhaustive les réseaux de transports routier et ferroviaire, de gaz et d'électricité, de données numériques et téléphoniques, d'adduction d'eau et les canaux de navigation. Si on considère que le projet concerne également le cheminement des déchets (cf. 1.1) depuis les centres de production, les réseaux à prendre en compte sont alors ceux de la figure 9 qui présente également les principaux sites de production de déchets nucléaires.

Figure 9 : Carte des réseaux de transport des déchets nucléaires en France. Source : dossier.

2.1.2.5 Nuisances sonores, vibratoires et lumineuses

Le dossier mentionne le suivi régulier des nuisances sonores depuis 1999 dans la zone d'émergence réglementée du laboratoire souterrain actuel. Des mesures complémentaires ont été réalisées en 2015, en 2017 en limite de propriété et en 2016 au niveau de l'installation terminale embranchée. Le dossier indique que les niveaux sonores sont compris entre 36,5 et 62,5 dB(A) mais ne précise pas, sauf dans le chapitre sur les méthodes, qu'il s'agit du niveau sonore équivalent (LAeq)[35]. Il est souligné que les sources de bruit sont les activités agricoles, le trafic routier, les passages d'avions militaires de la base aérienne de Saint-Dizier et les oiseaux.

[35] Le niveau LAeq est la grandeur définie dans la norme NF S 31-110 (Norme NF S 31-110 « Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Grandeurs fondamentales et méthodes générales d'évaluation ») : « Le niveau équivalent LAeq d'un bruit variable est égal au niveau d'un bruit constant qui aurait été produit avec la même énergie que le bruit perçu pendant la même période. Il représente l'énergie acoustique moyenne perçue pendant la durée d'observation ».

2.1.2.6 Paysage et patrimoine

Le site se caractérise par un paysage de plateau sauf pour la ligne ferroviaire qui est dans une vallée. La ligne électrique traverse une succession de vallées, côtes, plaines et plateaux. Une carte des paysages traversés est fournie. L'ensemble est illustré de nombreuses photographies.

Trois sites archéologiques classés appartenant à la cité gallo-romaine de Nasium sont présents dans l'aire d'étude rapprochée dont deux dans l'aire immédiate. Plusieurs autres vestiges des époques protohistorique, gallo-romaine et médiévale sont suspectés sur la base de relevés par lidar[36], ils se concentrent le long de la ligne ferroviaire entre Saint-Amand-sur-Ornain et Gondrecourt-le-Château et à proximité du site de la descenderie. Les diagnostics archéologiques le long de la ligne à 400 kV restent à effectuer.

Un seul site classé est recensé dans l'aire d'étude rapprochée, il s'agit du parc municipal de Ligny-en-Barrois. 18 monuments historiques classés ou inscrits sont présents dans l'aire d'étude rapprochée, notamment le long de la voie ferrée, 21 le long de la ligne à 400 kV et aucun dans l'aire d'étude immédiate.

Le dossier conclut que les enjeux de paysage et de patrimoine archéologique sont forts.

2.2 Analyse de la recherche de variantes et du choix du parti retenu

L'analyse des scénarios envisageables et le parti retenu pour le devenir à long terme des déchets radioactifs HA et MA-VL a pris en compte d'autres considérations que les seuls facteurs environnementaux :

- un encadrement strict des conditions d'élaboration et décisions relatives à ce projet par les lois et règlements nationaux, établis en interaction étroite avec les recherches de l'Andra, de l'IRSN et du CEA[37], voire le droit européen et les recommandations internationales ;
- l'acceptation locale de l'accueil de ces déchets : seuls quatre départements s'étaient portés candidats dans les années 90. La négociation avec les acteurs locaux a par ailleurs pu être un facteur déterminant de certains choix techniques et d'implantation ;
- l'ampleur financière et l'échelle de temps nécessaire à la réalisation de ce projet, quelle que soit l'option, avec l'obligation de mener à l'amont des études conséquentes : elles peuvent rendre difficiles l'analyse en profondeur des différentes options, qu'elles soient techniques ou d'implantation.

La préoccupation éthique et le choix technologique de réversibilité, introduits par la législation[38], trouvent leur origine dans ces différents éléments.

[36] Lidar est l'acronyme de Light detection and ranging, il s'agit d'un appareil qui mesure notamment les distances en comptabilisant le temps de retour d'impulsions lumineuses.

[37] CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

[38] L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement précise que « *la réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion.* » La réversibilité inclut la « *récupérabilité* », c'est-à-dire « *la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage* ».

2.2.1 Opportunité d'engager dès à présent le projet Cigéo

Le dossier justifie l'engagement de Cigéo dans les prochaines années par la volonté de ne pas reporter la charge du stockage des déchets sur les générations futures. Le dossier indique qu'« *aujourd'hui [...] l'avenir de la filière nucléaire n'est pas tracé avec certitude* » et souligne qu'il pourrait devenir de plus en plus difficile de trouver du personnel qualifié pour traiter ce genre de problématique. L'Ae observe que cet argument aurait pu justifier d'intégrer au projet un dispositif de formation et de pérennisation sur 150 ans des connaissances et des compétences acquises à l'occasion de la mise en œuvre du projet Cigéo.

D'autre part, toujours d'après le dossier, les technologies de stockage profond sont matures et le stockage étant réversible, son engagement ne préempte pas les éventuels choix technologiques ultérieurs. Cette affirmation ne semble pas vérifiée pour ce qui concerne la possibilité effective de récupérer des colis stockés en cas de situation accidentelle. L'IRSN souligne[39] que « *la possibilité de retrait de colis accidentés avec des moyens définis dès la conception n'a pas été étudiée* ». Le dossier ne comporte en effet pas d'élément qui la démontre. Des essais en vraie grandeur doivent être effectués afin de le vérifier avant mise en exploitation du stockage.

La réversibilité n'est prévue que pendant une phase assez courte au regard de la longue durée de vie et la nocivité des déchets radioactifs concernés. Même pendant cette période des incertitudes demeurent. Le même avis de l'IRSN « *considère qu'il n'est pas acquis que la conception retenue par l'Andra permette d'exercer, pendant la phase d'exploitation, une surveillance adaptée aux enjeux particuliers posés par la maîtrise des risques associés au stockage.* » L'Ae considère qu'il convient dès aujourd'hui de présenter un programme détaillé d'études complémentaires et de surveillance, d'indiquer les conclusions à atteindre, correspondant aux décisions à prendre à chaque étape. Parmi ces décisions, la possibilité d'arrêter le processus si les résultats ne sont pas à la hauteur des attentes doit être explicite.

L'Ae recommande de présenter, dès le dépôt de la demande de déclaration d'utilité publique, un programme détaillé d'études complémentaires de maîtrise des risques et de surveillance, ainsi que d'indiquer les conclusions à atteindre, correspondant aux décisions à prendre à chacun des étapes.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R14

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte les précisions suivantes.

Les options de sûreté se fondent sur un socle de connaissances scientifiques et technologiques acquis depuis plus d'une trentaine d'années et sur des boucles d'itération sureté/conception/connaissances scientifiques et technologiques menées depuis le début du projet Cigéo (cf. Chapitre 2.4.1 du volume II de l'étude d'impact du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo). Une synthèse des options de sûreté est jointe en annexe 1 du présent mémoire.

À la suite de l'instruction du dossier d'options de sûreté (DOS), l'Autorité de sûreté nucléaire a formulé un avis en 2018 (Avis 2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 (30)) et a identifié les compléments attendus pour le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo.

Dans le cadre du développement du projet de centre de stockage Cigéo, l'Andra a poursuivi ses études de conception, de consolidation de la connaissance et ses évaluations de la sûreté en exploitation et après fermeture en vue de préparer le dossier de demande d'autorisation de création et son instruction. Ces études visent notamment à apporter les éléments complémentaires de connaissances, de conception et de sûreté annoncés dans les options de sûreté et les réponses aux demandes de compléments formulées par l'ASN (à l'occasion de l'instruction du DOS et de l'instruction des dossiers antérieurs au DOS). Les objectifs visés en matière de conception, de sûreté et d'acquisitions des connaissances en vue du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) et de son instruction sont présentés en annexe 2 du présent mémoire.

À l'issue de l'instruction du dossier de DAC, le décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo, constituera un jalon décisionnel clé de son développement progressif. La construction de ses installations pourra alors démarrer, y compris celle des premiers ouvrages souterrains.

Sous réserve que l'autorisation de création de l'installation nucléaire du centre de stockage soit délivrée par décret (à l'horizon 2025), les principaux premiers jalons décisionnels identifiés par l'Andra sont les suivants :

- l'autorisation de la mise en service délivrée par l'ASN au cours de la Phipil (14) à l'horizon 2035-2040 :
  - ✓ conformément au code de l'environnement (article R. 593-29), cette autorisation permettra à l'Andra de recevoir des colis de déchets radioactifs pour des essais puis des opérations de stockage. Cette mise en service se limitera aux colis prévus dans le cadre de la phase industrielle pilote. Cette autorisation sera délivrée au regard notamment du retour d'expérience et des résultats de la surveillance de l'installation acquis au cours de la phase de construction initiale qui comprend aussi les essais en inactif (sans colis de déchets radioactifs) ;
- la loi votée par le Parlement fixant les conditions de poursuite du projet Cigéo à l'horizon 2040-2050 :
  - ✓ l'Andra produira le rapport de synthèse des résultats de la Phipil prévu par le code de l'environnement (article L. 542-10-1) ;
  - ✓ ce rapport sera instruit par l'ASN, la commission nationale d'évaluation (CNE) et donnera lieu au recueil de l'avis des collectivités territoriales. Il sera ensuite transmis par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques aux commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat pour que le Parlement décide par une loi des conditions de poursuite éventuelle de l'exploitation du centre de stockage Cigéo et en modifie éventuellement les conditions de réversibilité ;
  - ✓ l'Andra a proposé que ce rapport comporte un chapitre dédié à la surveillance de l'installation, notamment de ses parties en exploitation nucléaire pour le stockage des déchets radioactifs ;
- l'autorisation de mise en service de la phase qui suivra la Phipil, après instruction d'un dossier produit par l'Andra conformément aux orientations du Parlement :
  - ✓ si le Parlement décide de poursuivre le déploiement et l'exploitation du centre de stockage Cigéo, l'Andra préparera un dossier de demande de mise en service de la phase suivante, tenant compte des nouvelles orientations prévues par la loi. Cette autorisation de mise en service sera délivrée par l'ASN ;
  - ✓ si le Parlement décide de ne pas poursuivre l'exploitation du centre de stockage Cigéo et de mettre fin au stockage pour tout ou partie des déchets HA et MA-VL. L'Andra préparera un dossier de demande de décret de démantèlement et de fermeture, totale ou partielle, du centre de stockage Cigéo qu'elle transmettra aux autorités. Le centre sera modifié et fermé définitivement conformément aux prescriptions de l'autorisation de l'ASN ;
  - ✓ la surveillance de l'installation sera modifiée et approfondie en réponse aux objectifs et orientations de cette nouvelle phase, quelle que soit sa nature.

Pour l'ensemble de ces jalons, les éléments issus de la phase industrielle pilote constitueront des données essentielles. Les objectifs de cette phase industrielle pilote et les enseignements attendus au regard de ces jalons décisionnels ont été précisés dans l'étude d'impact (cf. Volume II, paragraphe 5.2 de l'étude d'impact). Cette phase a pour objectif de conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté de l'installation, notamment par un programme d'essais *in situ*. Elle inclut notamment des essais de récupérabilité des colis. Les objectifs de cette phase industrielle pilote seront par ailleurs complétés par les résultats de la concertation en cours relative à ce sujet (https://www.andra.fr/concertation-sur-la-phase-industrielle-pilote-de-cigeo). Conformément à la décision du 21 février 2020 de la ministre de la Transition écologique et solidaire et du président de

l'Autorité de sûreté nucléaire consécutive au débat public sur le Plan national de gestion des déchets et des matières radioactives (PNGMDR), c'est le PNGMDR qui « *définira les objectifs et les critères de réussite de la phase industrielle pilote* » (article 8).

En outre, dans le cadre de la concertation sur la gouvernance du centre de stockage (https://concertation.andra.fr/project/cigeo-gouvernance/presentation/presentation-de-la-gouvernance-du-centre-de-stockage-cigeo), l'Andra a proposé de publier régulièrement le jalonnement prévisionnel des décisions structurantes du projet. Le plan directeur de l'exploitation du centre de stockage prévu par le code de l'environnement (article L. 542-10-1) et qui sera mis à jour périodiquement (tous les cinq ans) en concertation avec les parties prenantes et le public permettra de tracer les décisions prises et les évolutions, y compris celles concernant le programme de surveillance.

Au-delà de la phase industrielle pilote, le développement du centre de stockage sera suivi d'autres jalons, successifs, s'inscrivant dans la même logique de progressivité.

En lien avec ces autorisations successives, l'Andra prépare un plan de développement de l'installation de stockage (PDIS) qui sera joint au dossier de DAC. Ce plan précisera, en termes d'objectifs et de moyens associés, les éléments de connaissances, de développement de la conception et de justification mais aussi de la démonstration de sûreté complémentaires pour :

- préparer la construction initiale ;
- préparer les mises en services :
  - ✓ du quartier de stockage HA (horizon 2080) ;
  - ✓ des tranches ultérieures aux quatre premiers alvéoles MA-VL dont l'exploitation est prévue lors de la Phipil ;
- préparer, dès les premiers jalons de mise en œuvre du projet, le démantèlement et la fermeture (par exemple *via* la mise en place de démonstrateurs de scellements dès la construction initiale pour consolider les choix retenus).

Toutes les étapes du développement, de la construction et du fonctionnement du stockage permettront d'intégrer à chaque étape les données acquises par la surveillance et d'intégrer les éventuelles avancées en matière de connaissances technologiques et scientifiques. Ceci permettra de consolider les éléments de démonstration nécessaires à ces autorisations successives et de préparer les étapes successives du projet, notamment la construction des quartiers de stockage postérieurs à la Phipil et la future fermeture du centre de stockage.

2.2.2 Choix du mode de gestion des déchets

Le dossier explicite les arguments qui ont justifié le choix par la France du stockage profond pour les déchets pour lesquels les autres options ont été jugées présenter plus d'inconvénients :

- isolement du rayonnement vis-à-vis des humains ;
- diminution du risque de perturbation naturelle ou humaine ;
- confinement dans des couches géologiques stables depuis plusieurs millions d'années ;
- utilisation de couches de perméabilité à l'eau très faible ;
- faible intérêt économique du sous-sol du secteur, limitant la probabilité d'une exploitation ultérieure (forage, mine, carrière).

Par ailleurs, l'ASN a exprimé le 1er février 2006[40] sa position, opposée à l'alternative qui consiste à entreposer les déchets dans l'attente du développement de technologies de transmutation en ce qu'elle « *suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et la reprise des déchets par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années* ». L'Ae s'interroge au chapitre 2.2.7 sur les conditions associées à un tel contrôle de la société concernant le stockage profond.

[39] *Op. cit.* note 6 page 8

[40] Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV

2.2.3 Les différents types de stockage profond

Parmi les types de stockage profond possibles, le dossier écarte le stockage géologique à très grande profondeur dans le socle cristallin ou volcanique ou à l'aide de forages dirigés suivant horizontalement les couches profondes. Les techniques de forage actuelles ne permettent pas de descendre les plus gros colis de déchets de 5 m³ et 10 t et des problèmes subsistent sur l'étanchéité des fermetures de forage. De plus, selon le dossier, ce type de stockage ne serait pas réversible et ne peut faire l'objet d'études préalables en laboratoire souterrain.

Le mode de stockage retenu repose sur l'utilisation de techniques minières. Le dossier souligne qu'il est considéré sur le plan international comme mature et qu'il est déjà pratiqué en Allemagne pour les déchets industriels les plus dangereux. Or les difficultés rencontrées par les stockages dans le sel gemme, de Stocamine en Alsace dont les alvéoles se referment sur les colis et de Asse en Allemagne, remettent fortement en cause cette assertion, notamment en matière de possibilité effective de récupérer des colis *a fortiori* lorsqu'ils sont endommagés.

2.2.4 Les couches géologiques utilisables

Le stockage profond peut avoir lieu dans différentes couches géologiques dont le dossier examine les caractéristiques. Les trois principales sont présentées ci-dessous.

Le sel

Le dossier souligne l'intérêt du stockage dans des gisements de sel gemme du fait de sa bonne conductivité thermique et de l'absence d'eau. Il mentionne toutefois des incidents ayant entraîné l'arrêt de tels stockages aux États-Unis et en Allemagne sans fournir de détails sur les causes des incidents.

» RÉPONSE DE L'ANDRA AU QUESTIONNEMENT DE L'AE

L'Andra prend acte de ce questionnement et confirme que les retours d'expérience de ces évènements ont été pris en compte dans la conception du centre de stockage Cigéo.

Le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo a été mis à jour avec les compléments de l'Andra.

Deux évènements ont entraîné l'arrêt, pour l'un temporaire et pour l'autre définitif, de l'exploitation d'installations de stockage dans le sel, aux Etats-Unis (WIPP – Waste Isolation Pilot Plant) et en Allemagne (Mine de Asse). L'évènement ayant affecté le WIPP n'est pas relié à la nature de la roche dans laquelle cette installation se trouve. En revanche, celui qui a affecté la mine de Asse est directement lié aux caractéristiques spécifiques du sel.

L'événement ayant affecté le WIPP aux États-Unis

Depuis 1991, le centre de stockage du WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) situé à Carlsbad dans l'État du Nouveau-Mexique reçoit des colis de déchets comparables à des déchets MA-VL, issus exclusivement du programme de défense américain. Il est implanté dans une couche de sel à une profondeur de 655 mètres.

Deux incidents successifs ont eu lieu au WIPP en 2014. Le 5 février 2014, un incendie s'est déclaré dans un camion de transport de sel à moteur diesel dans une galerie souterraine en chantier (sans présence de colis de déchets à proximité). Le rapport d'analyse a montré que le véhicule n'avait pas fait l'objet d'une maintenance régulière. Lorsque l'incendie s'est déclaré sur le camion, le dispositif d'alerte embarqué par alarme visuelle s'est déclenché mais n'a pas entrainé une réaction appropriée des opérateurs : d'une part l'alarme était masquée par divers matériaux et d'autre part le site ne disposait pas de procédure de crise et le personnel n'avait pas été formé à l'évacuation d'urgence.

Figure 2-8 Photographie du camion incendié au WIPP (37)

Puis le 14 février 2014, une réaction exothermique à l'intérieur d'un colis de déchets stocké dans une autre galerie provoque un relâchement de radioactivité à l'extérieur, en surface. Les éléments tirés de l'analyse des causes de cet accident montrent notamment que le producteur des déchets à l'origine du relâchement avait procédé à un changement de conditionnement de ses déchets, sans en avertir le WIPP : il avait remplacé un matériau argileux par un matériau organique. Le colis de déchets incriminé n'était donc pas conforme sans que cela n'ait été détecté lors de son admission sur le centre.

Les analyses post-accident ont exploré la possibilité d'un lien de causalité entre le premier incident, qui aurait élevé la température dans l'installation souterraine, et le second, qui aurait pu être amorcé par cette élévation de température. Un plan de remise en sûreté et exploitation du WIPP a été élaboré fin 2014 et mis en œuvre à partir de début 2015.

Les activités de mise en place des déchets ont repris en janvier 2017, après approbation des autorités.

Le retour d'expérience de cet événement réalisé par l'IRSN met en avant l'importance de la maîtrise du contenu des colis de déchets, la nécessité de prévoir des dispositions permettant de détecter suffisamment tôt une anomalie et de prévoir à la conception de l'installation les dispositions qui permettront de limiter les conséquences d'éventuelles dérives survenant en exploitation.

La synthèse des options de sûreté jointe en annexe 1 au présent mémoire détaille les mesures prises pour garantir la sûreté en exploitation du centre de stockage Cigéo concernant l'ensemble des risques considérés. Elle explicite notamment les mesures de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences d'un incendie (paragraphe 3.3.2 de la synthèse des options de sûreté), par exemple le choix de moyens de transport électriques sur rail limitant le risque d'incendie.

En ce qui concerne les colis, l'Andra définit, en application de la réglementation française, des spécifications d'acceptation des colis qui seront soumises à l'ASN pour approbation. Le respect de ces spécifications sera garanti par un processus d'approbation et d'acceptation des colis incluant des contrôles par les producteurs de déchets et par l'Andra, dont certains sont déjà réalisés afin de garantir dès à présent la maîtrise du contenu et du comportement des colis.

L'événement ayant affecté la mine de Asse en Allemagne

L'ancienne mine de potasse et de sel de Asse en Allemagne (Basse Saxe), dont l'exploitation a commencé en 1906, a été utilisée de 1965 à 1978 pour y stocker des déchets radioactifs de faible et moyenne activité (dont environ un pour cent s'apparente à des MA-VL). Le gisement de sel et de potasse de la mine de Asse se présente sous la forme d'un « dôme » (par opposition à une couche horizontale).

L'extraction de sel depuis 1906 s'est traduite par la création d'un nombre important de galeries et de grandes cavités laissées vides dans le dôme (représentant un volume total de 3,5 10^6 m^3). Quelques-unes des cavités issues de l'exploitation minière ont été réutilisées pour y placer les déchets radioactifs.

Les grands volumes vides créés dans le dôme par l'exploitation minière y génèrent progressivement d'importantes déformations qui se propagent jusqu'à l'un des flancs latéraux du dôme. Cela conduit à des venues d'eau souterraine provenant des formations géologiques adjacentes. Le sel étant sujet à dissolution, une intrusion d'eau à l'intérieur d'une formation saline tend en général à s'accentuer avec le temps. De la saumure contaminée a ainsi été repérée à partir de 1994 à l'intérieur de l'installation souterraine. Aujourd'hui, malgré des travaux de remblayage au voisinage des déchets, un risque d'effondrement des cavités souterraines et une arrivée d'eau susceptible de faire migrer des substances radioactives hors du stockage sont redoutés.

L'Allemagne a étudié plusieurs options pour la gestion du site : poursuivre le remblayage des cavités souterraines, déplacer ou retirer des colis de déchets stockés. L'option du retrait a été décidée. L'opération est néanmoins rendue complexe par le fait que le stockage n'avait pas été initialement conçu pour être récupérable. Concernant la gestion de ses déchets de façon générale, l'Allemagne a relancé la recherche d'un site en vue de l'enfouissement de ceux-ci.

Le retour d'expérience des événements survenus à Asse confirme l'intérêt des dispositions prises pour la conception du centre de stockage Cigéo. La conception du centre de stockage Cigéo est en effet dédiée au stockage des déchets radioactifs, elle n'utilise pas de cavités existantes et les dispositions sont prises pour permettre la récupérabilité des colis de déchets. Une séparation totale de la zone

d'exploitation nucléaire et de la zone où sont effectués les travaux de creusement est également retenue pour le centre de stockage Cigéo.

Le granite

Le granite est une roche dure et imperméable dans laquelle il est aisé de construire des galeries solides. Néanmoins, les failles qui traversent les massifs granitiques impliquent de s'assurer de l'étanchéité des conteneurs des colis. Cette solution, initialement envisagée, a été écartée en l'absence de territoires candidats à l'accueil d'un stockage et disposant d'un massif granitique compact d'une dimension suffisante pour accueillir les volumes de déchets radioactifs nationaux.

L'argile

L'argile présente une très faible perméabilité à l'eau et ses capacités d'adsorption[41] s'opposent au transfert de la plupart des radionucléides. Un autre avantage est la capacité de cette roche à se refermer sur elle-même avec le temps. Son principal point faible est l'apparition de fissures, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, pouvant alors constituer une voie de diffusion privilégiée des polluants.

[41] L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant) depuis une phase gazeuse, liquide ou une solution solide. Source Wikipedia.

Conclusion sur le choix de la roche à privilégier

Le dossier indique que des études préliminaires ont eu lieu dès 1987 dans quatre sites de nature géologique différente : le granite, le schiste, le sel et l'argile. En 1993, trois sites ont été envisagés. Aucun site granitique couplant faisabilité technique et volontariat du territoire n'a pu être identifié. Le deuxième site argileux (dans le Gard) étant également inadapté, seul le site du projet Cigéo s'est révélé adéquat.

Le dossier présente les principaux résultats des recherches entreprises dans le laboratoire souterrain de Bure. Ces recherches ont permis de vérifier en grande partie l'aptitude du sous-sol de ce territoire à accueillir le stockage. Elles n'ont cependant aucun caractère comparatif.

Le choix de la roche à favoriser s'est trouvé *in fine* extrêmement réduit. Le choix d'une couche d'argile a été rendu possible grâce au volontariat des collectivités locales, ce qui a conduit à n'implanter qu'un seul laboratoire souterrain national à Bure. L'Ae considère que l'importance des enjeux aurait mérité que plusieurs sites aient fait l'objet d'expérimentations afin de disposer d'un éventail d'informations sur les risques sanitaires et environnementaux en appui de la décision. Le code de l'environnement ne requiert pas que soit retenue la meilleure option sur le plan environnemental. Toutefois les enjeux de ce projet et l'échelle de temps des effets de ce choix nécessitent une démonstration solide par rapport aux alternatives possibles.

L'Ae recommande de comparer les avantages et les inconvénients environnementaux, y compris à très long terme, des différents types de stockage pour pouvoir démontrer que le choix de la couche d'argilite du Callodo-Oxfordien est bien le plus adapté pour engager aujourd'hui l'avenir sur plusieurs millénaires.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R15

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte les précisions suivantes.

La recherche de milieux géologiques pour le stockage des déchets HA et MA-VL a commencé en France il y a près de 40 ans. Les divers types de roche envisageables ont été étudiés et comparés au cours des différentes périodes qui se sont succédées, Ces études se sont appuyées non seulement sur l'analyse des formations géologiques du territoire français mais aussi sur l'expérience internationale. En effet l'argile, le granite et, le sel gemme notamment ont aussi été étudiés dans d'autres pays. Il ressort des études à l'international qu'il est possible de concevoir des stockages dans ces différentes roches qui assurent une protection satisfaisante de la santé humaine et de l'environnement. Au final, dans le contexte géologique français, l'argile du Callovo-Oxfordien étudiée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne est ressortie comme particulièrement favorable au regard notamment de ses propriétés de confinement élevées.

Les différents types de stockage étudiés de 1987 à 1993 : granite, argile, sel et schistes

En mars 1987, l'Andra, entité créée au sein du CEA en 1979, annonçait qu'elle avait retenu quatre formations géologiques pour y entreprendre des travaux de reconnaissance préliminaires :

- le massif granitique de Neuvy-Bouin, à l'ouest de Parthenay (Deux-Sèvres) ;
- le sous-sol argileux d'une zone située au nord de Sissonne (Aisne) ;
- le sel présent dans le sous-sol de la région de St-Julien sur Reyssouze (Ain) ;
- les schistes présents dans le sous-sol d'une zone située au sud-ouest de Segré (Maine-et-Loire).

Cette annonce s'inscrivait dans le cadre d'un programme général établi par le CEA en 1983 que Jean Auroux, le secrétaire d'État chargé de l'énergie, avait présenté au Conseil supérieur de la sûreté nucléaire le 19 juin 1984 (« Orientations retenues par la France en matière de gestion des déchets radioactifs »).

L'annonce de l'Andra en mars 1987 constituait le terme de la première phase de ce programme à savoir « *l'inventaire national et la présélection de zones a priori favorables.* ». Cette phase avait été « *conduite par l'ANDRA avec l'appui du bureau de recherches géologiques et minières* [BRGM] ». Elle avait « *consisté en une revue de données géologiques disponibles sur le sous-sol français (bibliographies, forages effectués dans le cadre de recherches pétrolières ou minières, etc.) afin de choisir quatre zones dont le sous-sol présente des caractéristiques favorables.* »

La deuxième phase qui devait alors s'enclencher consistait en « *la sélection d'un site pour l'implantation d'un laboratoire souterrain.* ». Il s'agissait alors de reconnaitre les quatre zones présélectionnées « *au moyen d'études géophysiques conduites à partir de la surface (gravimétrie, sismique), de forages superficiels et de forages profonds.* »

Concernant le sel et les schistes, l'Andra en présentait alors les avantages et les inconvénients génériques comme suit :

« *Les formations salines présentent des avantages indéniables, qui tiennent d'une part à l'absence d'eau libre, d'autre part à leurs propriétés mécaniques permettant une exploitation aisée par l'excavation de galeries de grands volumes où peuvent circuler des engins ; en outre, la plasticité du sel assure un colmatage au bout de quelques siècles des vides subsistant après le rebouchage des ouvrages. Le sel présente au regard de ces avantages, l'inconvénient de constituer un minerai exploité industriellement et d'être également un milieu utilisé à des fins de stockage (gaz, pétrole). De plus, la formation saline doit être tenue à l'abri des venues d'eau, et la réalisation des puits d'accès doit en tenir compte.* »

« *Les formations schisteuses recouvrent une vaste catégorie de roches, qui se distinguent des argiles principalement par leurs propriétés mécaniques. Du point de vue du confinement des déchets, leur intérêt réside dans leur grande imperméabilité générale, leur faible fracturation, et une plasticité résiduelle pouvant entraîner l'auto-colmatage des fissures et des fractures éventuelles. Par ailleurs leurs propriétés mécaniques sont plus favorables au génie minier que celles des argiles. Par contre, la faible conductivité thermique limite, comme pour les argiles, les possibilités de stockage de déchets à fort dégagement de chaleur ; de plus l'anisotropie du milieu, la présence de schistosités et de discontinuités compliquent, comme dans le cas des roches cristallines la démonstration de la sûreté d'un éventuel stockage de déchets.* »

Pour ce qui concerne plus spécifiquement le sel, il est à noter que le groupe de travail présidé par le professeur Raymond Castaing, mandaté par le conseil supérieur de la sûreté nucléaire, avait attiré l'attention dès 1984 (15) sur le risque d'intrusion particulier dans ce type de formation. Elle recommandait « *que l'éventuelle prise en considération, en France, d'une formation saline pour l'enfouissement de déchets de type B [i.e. MA-VL] ou C [i.e. HA] soit précédée d'une étude détaillée des conséquences d'une intrusion humaine dans un site de stockage dont la mémoire n'aurait pas été conservée. Quels que soient les avantages qui, pour un tel milieu de stockage, apparaissent résulter de l'absence d'eau en situation normale, il est nécessaire que les conséquences d'une telle intrusion humaine y soient jugées acceptables ; en effet la probabilité d'une telle intrusion, liée par exemple à l'extraction de sel ou à la réalisation de cavités de stockage de produits divers, ne nous paraît pas - du moins dans le cas de la France -, si elle est cumulée sur de très longues durées, pouvoir être tenue a priori pour négligeable.* »

Les reconnaissances géologiques des quatre zones présélectionnées ont été interrompues suite à l'opposition manifestée par les populations locales. Ces zones avaient été choisies sur la base de critères purement techniques pour la protection de la santé et de l'environnement. L'absence de concertation préalable a conduit à l'échec de cette démarche.

Le 9 février 1990, le Premier ministre décidait un moratoire sur l'ensemble des sites et confiait au député du Nord et membre suppléant de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Christian Bataille, une mission d'information sur la gestion des déchets nucléaires à haute activité.

Monsieur Bataille a constaté « sur les quatre sites que les élus et les représentants de la défense étaient pratiquement tous opposés à la poursuite des travaux de l'Andra » (16).

Les recherches sur la gestion des déchets de haute activité et à vie longue sont alors entrées sous le contrôle du Parlement avec la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (17). Cette loi reprenait des propositions issues de la mission d'information de Monsieur Bataille. En particulier les recherches de site sont désormais doublement fondées à la fois sur l'approche technique de la protection de la santé et de l'environnement, mais aussi sur la consultation des élus et des populations des territoires concernés (Article 6).

Dans le cadre de la mission de médiation sur l'implantation de laboratoires de recherche souterrains, confiée ensuite à Monsieur Bataille par l'État, qui s'est déroulée du 13 août 1993 au 13 février 1994, aucun territoire comportant une formation saline ou schisteuse dans son sous-sol, susceptible de pouvoir accueillir un laboratoire souterrain, puis éventuellement un stockage, ne s'est porté candidat à un tel projet. Les options de stockage en milieu salin ou schisteux n'ont, depuis lors, plus été étudiées par l'Andra.

Les stockages en milieu salin aux États-Unis et en Allemagne

Le sel a été retenu aux États-Unis pour le stockage géologique de déchets MA-VL provenant des activités de défense. Ce centre de stockage (le WIPP : Waste Isolation Pilot Plant) situé à Carlsbad dans l'État du Nouveau-Mexique reçoit des colis de déchets depuis 1991. Il est implanté dans une couche de sel à une profondeur de 655 mètres.

L'ancienne mine de potasse et de sel de Asse en Allemagne (Basse Saxe), datant de 1906, a été utilisée de 1965 à 1978 pour y stocker des déchets radioactifs de faible et moyenne activité (dont environ un pour cent s'apparente à des MA-VL). Cette mine a aussi servi de lieu d'expérimentations en vue du stockage de déchets HA sur un autre site de Basse Saxe, le « dôme[7] » de sel de Gorleben. Les expérimentations correspondantes n'ont pas impliqué l'introduction de déchets HA.

Le dôme de sel de Gorleben a fait l'objet quant à lui de travaux d'exploration géologique intensifs par puits et galeries souterraines : il ne s'agit pas d'une ancienne mine, mais d'un dôme qui n'a jamais été exploité auparavant pour l'extraction de sel. Le projet de stockage de Gorleben est aujourd'hui suspendu, l'Allemagne ayant décidé de repartir sur un nouveau programme de développement du stockage géologique de déchets HA en l'ouvrant aussi sur d'autres types de roches (argile, granite).

Un autre centre de stockage de déchets de faible et moyenne activité en formation saline existe dans l'ex République démocratique allemande (Saxe-Anhalt). Ce centre situé à Morsleben a été aménagé en 1971 dans une ancienne mine de potasse et de sel. Il a accueilli des déchets jusqu'en 1998.

Le caractère soluble du sel rend le milieu salin très sensible à une intrusion d'eau. Lorsque l'on réalise des travaux dans un tel milieu, a fortiori pour un stockage de déchets, des précautions doivent être prises pour maintenir durablement la protection du sel vis-à-vis de l'eau présente au voisinage de la formation saline. De telles précautions n'avaient pas été suffisamment prises dans le cadre de l'exploitation de la mine de Asse, ce qui a conduit à l'incident décrit précédemment dans la réponse de l'Andra au questionnement de l'Ae. En tout état de cause une exploitation minière, de par sa nature, est beaucoup plus perturbatrice du milieu géologique que tout autre type de travaux souterrains. Dans la mine de Asse, la proximité immédiate du stockage des déchets et des anciens travaux miniers a constitué un facteur aggravant.

La poursuite de l'étude du stockage en milieu granitique à partir de 1993

Dans le cadre de la mission de médiation confiée par l'État à Monsieur Bataille suite à la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 suscitée, un site granitique avait été sélectionné dans la Vienne pour l'implantation éventuelle d'un laboratoire de recherche souterrain sur la double base (i) technique, à partir des connaissances préexistantes, et (ii) du volontariat pour poursuivre des recherches. Il a fait l'objet par l'Andra :

- de reconnaissances géologiques depuis la surface pour mieux évaluer sa potentialité technique ;
- de l'élaboration d'un avant-projet de laboratoire souterrain, en vue de la poursuite des investigations de manière plus détaillée.

En 1996, l'Andra a déposé une demande d'installation et d'exploitation d'un laboratoire souterrain sur la commune de La Chapelle Bâton. En 1997, l'enquête publique se conclut par un avis positif en 1997. Les préfets donnent également un avis positif.

Dans son rapport d'évaluation numéro 2 de juin 1996 (18), la CNE marquait d'ores et déjà de fortes réserves sur le site de la Vienne. Ces réserves mettaient en avant la fracturation du granite, susceptible de ne pas permettre au granite de constituer une barrière suffisante aux radionucléides, une possible connexion hydraulique du granite avec une formation aquifère sus-jacente exploitée comme ressource en eau et en conséquence un risque de contamination radiologique à long terme de cette formation aquifère :

[7] Un dôme de sel est une configuration géométrique particulière de sel en souterrain. Il s'est formé par « diapirisme » sous l'effet du fluage : il s'agit d'une remontée progressive, en direction de la surface, du sel provenant d'une couche horizontale profonde.

« *En résumé, la Commission a considéré que le site de la Vienne présente des conditions hydrogéologiques tant au point de vue du granite lui-même que des aquifères sus-jacents, qui ne semblent pas favorables pour un éventuel stockage. Cela ne veut pas dire que ces conditions soient nécessairement rédhibitoires, mais seules des études préliminaires plus approfondies conduites à partir de la surface, puis dans le laboratoire souterrain, accompagnées d'une étude de sûreté, pourrait permettre de l'établir. Pour ces raisons, la Commission n'est pas en mesure d'émettre aujourd'hui un avis sur l'implantation et l'exploitation d'un laboratoire souterrain sur le site de la Vienne durant la phase d'instruction qui suivre le dépôt d'un dossier par l'Andra et à la lumière des informations complémentaires qui seront apportées sur les questions évoquées ci-dessus.*

La Commission est cependant consciente que les formations granitiques peuvent constituer une alternative valable au stockage dans les milieux argileux ; si un site dans le granite n'était pas retenu en France pour y construire un laboratoire souterrain, cela impliquerait que seules les roches argileuses seraient dorénavant étudiées. La Commission recommande que les conséquences d'un éventuel abandon du site granitique soit évalué au regard des stratégies qui seront retenues (stockage en l'état des combustibles irradiés, réversibilité à 50 ou 100 ans…). Certaines difficultés pourraient être levées si le granite était affleurant en surface (absence d'aquifères dans le recouvrement sédimentaire, meilleure connaissance de la cartographie du toit des roches cristallines). »

Dans son rapport d'évaluation n° 3 de septembre 1997 (19), partant des résultats complémentaires apportés par l'Andra, la CNE confirmait son diagnostic négatif sur le site de la Vienne mais maintenait ouverte l'option du granite :

« *Dans le site de la Vienne, l'évaluation des nouvelles données hydrogéologiques et géochimiques présentées ne permet pas de lever les réserves déjà exprimées par la Commission. Il existe des risques de circulation de fluides entre le granite et les aquifères exploités qui, en l'absence de concept de stockage propre à ce site précisant notamment le rôle de la barrière géologique, augmentent considérablement la difficulté de qualifier ce site particulier pour un éventuel stockage. De plus, la Commission considère que les formations granitiques peuvent constituer, dans certaines conditions, une alternative valable au stockage dans les milieux argileux ; en particulier, certaines difficultés rencontrées sur le site de la Vienne pourraient être levées dans un site où le granite serait affleurant en surface. Un décalage dans le temps des travaux sur des laboratoires différents ne serait pas forcément préjudiciable.* »

Compte tenu notamment des réserves émises par la CNE, le gouvernement n'a pas retenu le site proposé dans la Vienne pour l'implantation d'un laboratoire souterrain. Il a en revanche lancé en août 1999 une nouvelle mission pour la recherche d'un autre site granitique, confiée aux ingénieurs généraux Pierre Boisson et Philippe Huet et au préfet Jean Mingasson. Quinze massifs granitiques avaient été présélectionnés par l'Andra avec l'appui du BRGM pour leurs qualités géologiques et hydrogéologiques potentielles, en évitant la situation d'un granite sous couverture sédimentaire telle que rencontrée dans la Vienne. La mission avait pour objectif principal de recueillir l'avis des territoires. Aucun territoire n'a manifesté un intérêt et la mission s'est achevée à la mi-2000 sur le constat de devoir cesser la recherche d'un site granitique en France pour l'implantation d'un laboratoire souterrain.

L'Andra a néanmoins poursuivi des études et recherches sur la faisabilité du stockage en milieu granitique en se fondant notamment sur les enseignements des laboratoires souterrains d'autres pays. Elle a mis en place une équipe dédiée à ces études et recherches. Cette équipe a modélisé le milieu granitique, développé des options de conception adaptées au caractère fracturé du granite (cf. Figure 2-9 et figure 2-10), étudié le comportement dans le temps d'un stockage en milieu granitique et son approche de sûreté. L'ensemble de ces études et recherches sur le granite a été coordonné avec celles sur le milieu argileux afin de pouvoir mettre en perspective leurs résultats respectifs. L'Andra a ainsi fourni les résultats sur l'option granite en 2005 en parallèle à ceux obtenus au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : réf. Dossier 2005 Granite, Andra 2005 (20) (https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/267.pdf).

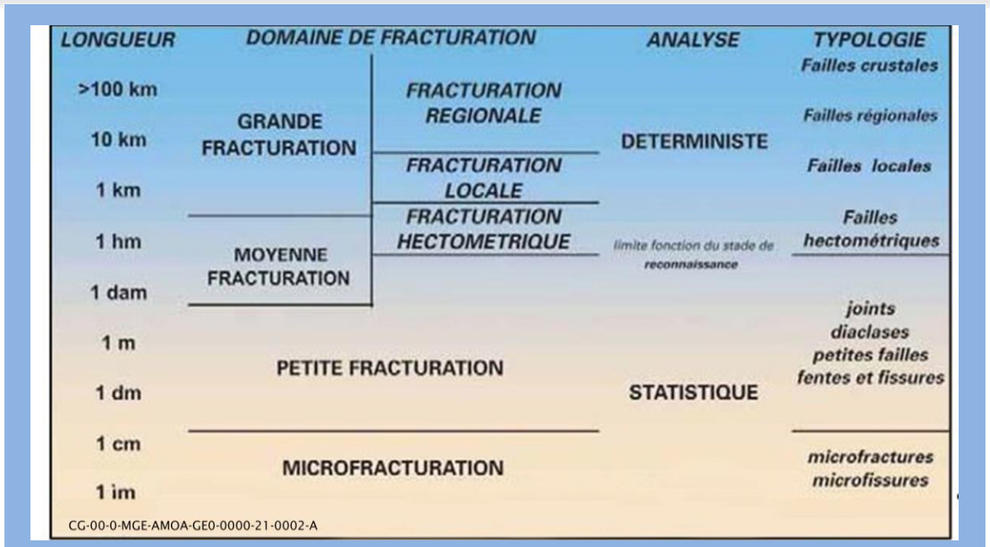


Figure 2-9 *Échelles de fracturation du granite (extrait du Dossier 2005 Granite, Andra 2005 (20)*

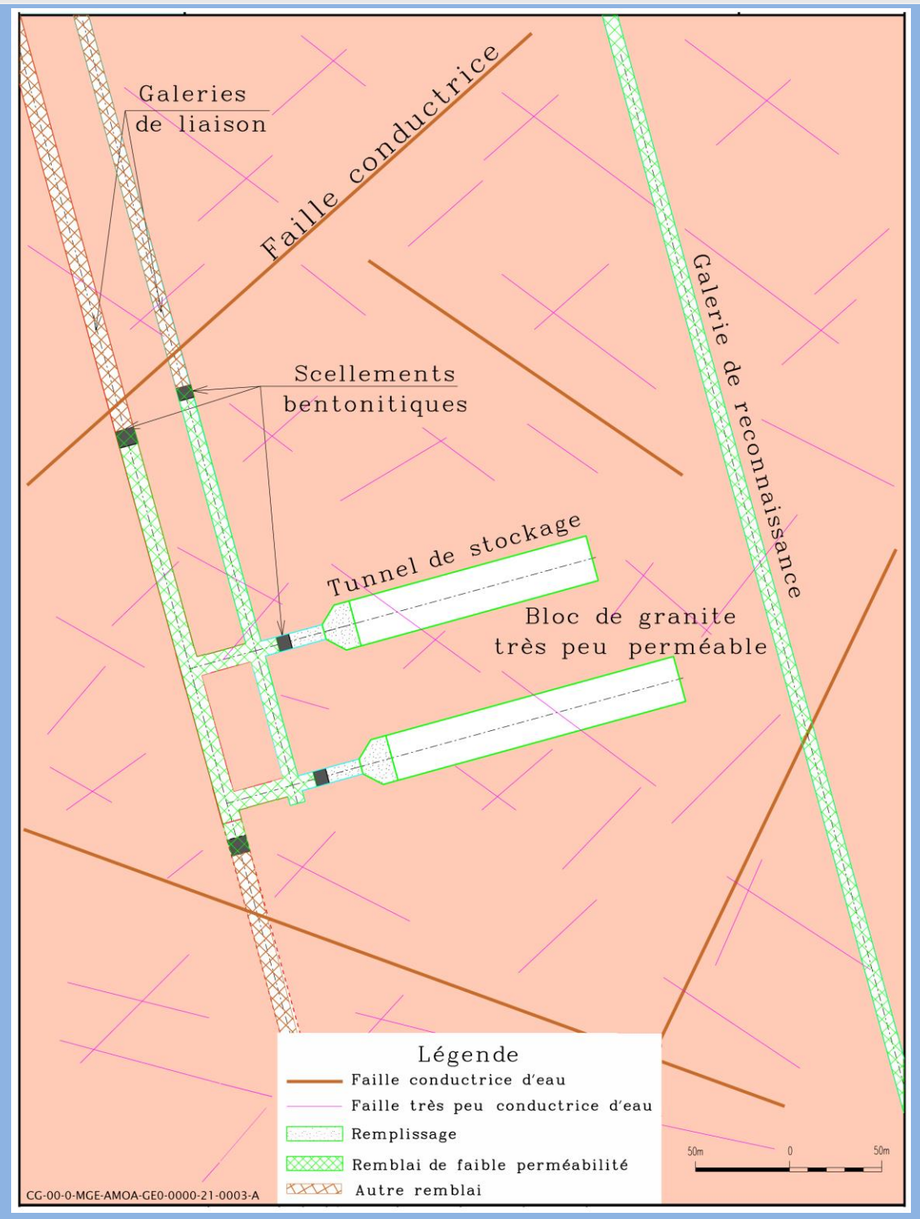


Figure 2-10 *Étude de l'implantation d'alvéoles de stockage MA-VL en tenant compte de la fracturation du granite (vue en plan, extrait du Dossier 2005 Granite, Andra 2005)*

Dans son rapport global d'évaluation publié en 2006 (21) la CNE a examiné ces résultats comme ceux consacrés à l'argile de Meuse/Haute-Marne. Elle les a synthétisés comme suit :

« Le dossier Granite 2005 évalue les possibilités qu'offre la roche granitique pour le stockage profond. En l'absence de site désigné, l'Andra a travaillé sur une base générique. Ses études ont été menées sur plusieurs massifs français et en participant à de nombreux programmes expérimentaux d'études des possibilités de stockage en massif granitique dans le monde (Suède, Finlande, Suisse et Canada).

Le rapport explicite les caractéristiques générales des granites : de bonnes propriétés mécaniques et une quasi-étanchéité à l'intérieur de blocs délimités par des fractures d'extension, d'espacement et d'ouverture variables. Ces fractures conduisent plus ou moins bien l'eau selon qu'elles sont grandes ou petites, ouvertes ou colmatées, et selon leur fréquence (nombre de fractures par mètre) qui détermine leur connectivité. Certaines peuvent être colmatées par des dépôts secondaires qui constituent alors des pièges potentiels pour des radionucléides. On voit ainsi que la qualité d'un site granitique pour un stockage dépend primordialement de sa fracturation. En s'appuyant notamment sur les données acquises dans 78 sites français, l'Andra a développé la démarche de reconnaissance d'un site granitique (…) De ces études approfondies, il ressort que même si un laboratoire souterrain permettait de reconnaître la bonne qualité d'un granite à l'échelle d'un bloc quasi étanche (parce que peu fracturé) de quelques centaines de mètres de côté, il serait loin d'être simple et nullement assuré dans le contexte français qu'on puisse trouver le volume nécessaire pour un stockage. En effet, celui-ci nécessiterait de trouver une soixantaine de blocs similaires répartis sur un millier d'hectares.

La collaboration de l'Andra aux programmes étrangers lui a permis de mettre au point une méthodologie, de tester et maîtriser différentes techniques de reconnaissance (…). Ces travaux lui ont également permis de disposer d'une expérience en matière de modélisation, notamment sur la circulation des fluides en milieu fracturé (…) Des simulations ont été réalisées pour apprécier l'évolution et l'impact sur le long terme d'un stockage théorique et l'Andra a ainsi pu tester les méthodes d'analyse de sûreté qu'elle serait amenée à employer (…). »

La CNE conclut : « L'Andra, par ses études génériques, a montré qu'elle avait développé les compétences et les principes applicables à un site granitique qui lui serait proposé sur le territoire national. La CNE rappelle toutefois que les caractéristiques et l'histoire géologique des granites français sont fort différentes de celles des boucliers scandinave ou canadien. En France, les massifs granitiques sont de petite taille et ont été affectés par plusieurs orogenèses qui ont pu les fracturer. C'est pourquoi l**a CNE estime que la possibilité de trouver sur le territoire français une zone granitique apte à faire l'objet d'une étude et d'un laboratoire permettant la qualification d'un site de stockage est assez restreinte.** »

Ces résultats ont aussi été évalués en 2006 par l'ASN (22): « *L'examen du dossier 2005 granite, établi par l'ANDRA sur la base des connaissances bibliographiques des milieux granitiques français et des études menées à l'étranger, montre que les formations granitiques sont susceptibles d'offrir des caractéristiques favorables à l'implantation d'un stockage, du point de vue de la tenue mécanique et thermique. Néanmoins,* ***peu de formations françaises ont été reconnues en profondeur, et en conséquence, des connaissances importantes resteraient à acquérir, notamment du point de vue de leur degré de fracturation et de leurs propriétés hydrauliques. La recherche d'un site granitique en vue d'y implanter un second laboratoire ne paraît pas toutefois prioritaire du point de vue de la sûreté, notamment compte tenu des propriétés favorables reconnues sur le site de Bure.*** »

Analyse comparative

Nonobstant l'absence à ce jour de site granitique en France qui aurait manifesté au niveau territorial un intérêt pour l'implantation d'un laboratoire souterrain et qui serait reconnu par l'expertise comme potentiellement apte à confiner des déchets HA et MA-VL, sont présentés dans la suite des éléments de comparaison du granite et de l'argile comme formations d'accueil potentielles, en distinguant d'une part les phases de construction initiale et de fonctionnement, d'autre part les phases de surveillance et de post-surveillance assimilables à la période de long terme après la fermeture. Outre le dossier du projet de centre de stockage Cigéo en Meuse/Haute-Marne, ces éléments se fondent sur les études et recherches que l'Andra a menées sur le granite jusqu'en 2005, notamment dans la période 2000-2005 grâce aux travaux des laboratoires souterrains étrangers auxquels l'Andra participait, ainsi que plus largement sur l'expérience internationale.

- **Incidences environnementales comparées en phases de construction et de fonctionnement :**

  Les études ont montré que l'installation souterraine de stockage représenterait un volume de roche excavée du même ordre dans le granite ou dans l'argile (de l'ordre de 5 à 7 millions de mètres cubes dans les conditions des études remises en 2005), malgré des caractéristiques physiques différentes. En effet, certains effets tendent à se compenser vis-à-vis du volume excavé.

  En relatif, l'argile présente une conductivité thermique et une résistance mécanique plus faibles que celles d'un granite. Cela se traduit dans l'argile par :

  - ✓ la nécessité d'écarter davantage les colis de déchets de haute activité les uns des autres, de manière à limiter l'augmentation de température induite par la chaleur qu'ils dégagent ;
  - ✓ la pose d'un revêtement de béton suffisamment épais pour soutenir les galeries souterraines et leur permettre de résister aux contraintes mécaniques appliquée par le poids des roches sus-jacents durant la période d'exploitation.

La fracturation naturelle du granite entraîne d'autres types de contraintes qui y augmentent le volume à excaver :

- pour placer les alvéoles de stockage à une distance suffisante des fractures les plus importantes, la longueur des galeries d'accès à ces alvéoles doit être augmentée par rapport à un milieu géologique continu comme l'argile : ce facteur tend à s'opposer à l'aspect plus favorable du granite vis-à-vis de la conduction de la chaleur ou encore la possibilité mécanique d'y creuser des alvéoles de plus grand volume unitaire pour certains déchets MA-VL ;
- ces fractures les plus importantes et l'existence éventuelle de petites fissurations à l'intérieur des blocs délimités par les plus grandes fractures imposent d'interposer entre les déchets et la roche granitique des « barrières ouvragées » plus importantes en termes de volume occupé. Ces barrières ont été identifiées par l'Andra dans ses études et se retrouvent à l'étranger dans les pays ayant retenu le milieu granitique (Suède et Finlande). Ainsi dans les alvéoles de déchets HA, une épaisse barrière composée d'argile gonflante compactée entoure les colis de déchets, alors qu'une telle barrière est inutile en milieu argileux, ce dernier assurant une fonction similaire. Dans les alvéoles MA-VL, même si les besoins en soutènement mécanique sont moindres, des parois épaisses en béton sont interposées autour des colis de déchets, contribuant à renforcer leur confinement, notamment en apportant des propriétés chimiques de rétention. À titre d'exemple, le stockage suédois de déchets de faible activité actuellement exploité à faible profondeur (environ 60 m) en milieu granitique (le « SFR » (23)) interpose entre les déchets et la roche, d'une part un voile robuste de béton et d'autre part un remplissage en argile gonflante d'au moins un mètre d'épaisseur.

L'impact environnemental de l'excavation, notamment en termes de gaz à effets de serre, est dû principalement (i) au béton de revêtement utilisé pour soutenir la roche, plus important dans le cas de l'argile, et (ii) à l'énergie nécessaire à l'abattage de la roche, plus élevée dans le cas du granite du fait de sa plus grande résistance et de sa plus grande dureté.

Outre le béton pour le soutènement de la roche, la comparaison doit aussi prendre en compte tous les autres matériaux rapportés pour équiper, puis pour fermer l'installation souterraine. Le granite se singularise fortement sur ce plan par la nécessité d'apporter de grands volumes d'argile gonflante (bentonite) pour constituer les « barrières ouvragées ». Cette argile sera placée autour des déchets comme indiqué plus haut et constituera aussi le matériau de base pour le remplissage des galeries souterraines (parfois seule, parfois en mélange avec du granite récupéré lors du creusement). Cette argile doit répondre à des critères précis en termes de capacité de gonflement et de propriétés chimiques. Ainsi le projet suédois de stockage géologique se fonde sur une bentonite gonflante importée du Wyoming (USA). Il existe en France et en Europe des gisements d'argile gonflante susceptibles de répondre au besoin. Il faudrait alors extraire cette argile en carrière, la conditionner sous une forme adaptée à son utilisation en barrière ouvragée (broyage puis recompactage) puis la transporter jusqu'au centre de stockage géologique implanté dans le granite. Les volumes correspondant sur l'ensemble du cycle de vie du centre devraient représenter une grande part du volume excavé.

En milieu argileux, seuls quelques scellements ponctuels construits lors de la fermeture de galeries et des liaisons surface-fond nécessiteront l'apport d'argile gonflante, ce qui représente des quantités faibles par rapport au milieu granitique. Le remplissage de la plus grande partie des ouvrages souterrains s'effectue en effet avec l'argilite extraite lors du creusement, puis entreposée en verse en surface dans l'attente de sa réutilisation pour la fermeture de l'installation souterraine.

Les installations de surface peuvent être considérées comme globalement similaires pour l'exploitation d'un stockage en formation argileuse ou en milieu granitique. Comme indiqué plus haut, les exigences plus fortes sur les matériaux de remplissage des cavités souterraines dans le granite pourraient néanmoins se traduire par davantage d'installations en surface, sur le site de stockage ou à distance. En tout état de cause les incidences seront davantage liées aux caractéristiques environnementales du site d'implantation qu'à la nature de la formation géologique d'accueil. Il en est de même pour les incidences des opérations d'exploitation (ventilation etc.) du centre de stockage.

- **Incidences environnementales comparées à long terme :**

  La principale différence du point de vue environnemental entre un stockage de déchets MA-VL et HA en milieu granitique ou argileux concerne le long terme.

  Les déchets HA comme les déchets MA-VL contiennent d'assez grandes quantités de produits de fission et d'activation à vie longue mobiles : Iode 129, Chlore 36, Technétium 99, Sélénium 79. Si ces radionucléides ne constituent pas le principal terme de radiotoxicité des déchets HA et MA-VL, ils en contraignent fortement la gestion à long terme de par leur grande mobilité associée à une longue période. Lorsque de l'eau provenant de la formation géologique d'accueil parvient au contact des déchets, ces radionucléides relâchés par les déchets passent alors en solution dans l'eau puis peuvent migrer par diffusion dans l'eau et, si l'eau souterraine circule, par convection. De par leurs caractéristiques chimiques, ils ne sont pas ou très peu retenus par les matériaux ouvragés qu'ils rencontrent (ils ne s'adsorbent pas à la surface des matériaux) et pas par la roche :

  La très faible perméabilité d'une formation argileuse comme le Callovo-Oxfordien, combinée à sa forte épaisseur, permet de retarder drastiquement leur migration, et de limiter et de diluer les quantités arrivant jusqu'aux limites de la couche, et de limiter fortement leur concentration dans les formations plus perméables situées au-delà de la couche et en conséquence leur impact environnemental et sanitaire potentiel.

  La maîtrise du comportement de ces radionucléides dans un milieu fissuré comme le granite est beaucoup plus complexe. En effet lorsqu'ils atteignent une fissure dans laquelle l'eau circule, ils sont transportés plus rapidement par convection jusqu'à l'extérieur du massif granitique. C'est pourquoi les alvéoles de stockage en milieu granitique doivent être éloignées des fractures principales. Cependant le granite peut comporter diverses échelles de fracturation, et l'existence éventuelle de fissures plus petites doit être prise en compte à l'intérieur des blocs dans lesquels les alvéoles de stockage sont implantés. Ainsi chaque alvéole risque de croiser des petites fissures qui constitueront le siège d'une petite circulation d'eau ; celles-ci connecteront l'alvéole à une grande fracture qui constituera elle-même un chemin de migration privilégié vers l'environnement.

  C'est ce mécanisme qui a conduit la CNE à émettre des réserves sur le site de la Vienne, une formation aquifère se trouvant au toit du granite et pouvant donc, selon la CNE, être contaminée de manière excessive par des radionucléides, plus particulièrement ceux dit mobiles à vie longue.

  Les barrières ouvragées interposées entre les déchets et la roche granitique permettent néanmoins de renforcer le confinement des déchets. Cependant, on ne peut attendre d'une barrière artificielle argileuse d'épaisseur métrique la même performance de confinement des radionucléides mobiles que plusieurs dizaines de mètres d'agile naturelle, cela d'autant plus que la barrière artificielle se situe au voisinage immédiat des déchets avec lesquels elle peut subir des interactions physico chimiques susceptibles d'altérer ses propriétés initiales.

  La Finlande et la Suède, dont le territoire est essentiellement constitué de granite, développent un stockage de combustibles usés non retraités en milieu granitique (en cours de construction en Finlande et en cours d'autorisation en Suède). Compte tenu des difficultés évoquées plus haut, la principale barrière de confinement dans ces projets est constituée par le conteneur : une peau en cuivre de cinq centimètres d'épaisseur vise à assurer une étanchéité à l'eau pendant plusieurs centaines de milliers d'années. Tant que cette peau de cuivre reste étanche, aucun radionucléide n'est relâché dans le granite. En revanche, lorsqu'un conteneur défaille, les combustibles usés

qu'il contient relâchent une part de leur contenu en radionucléides mobiles qui va ensuite atteindre l'environnement et entrainer potentiellement un impact sanitaire.

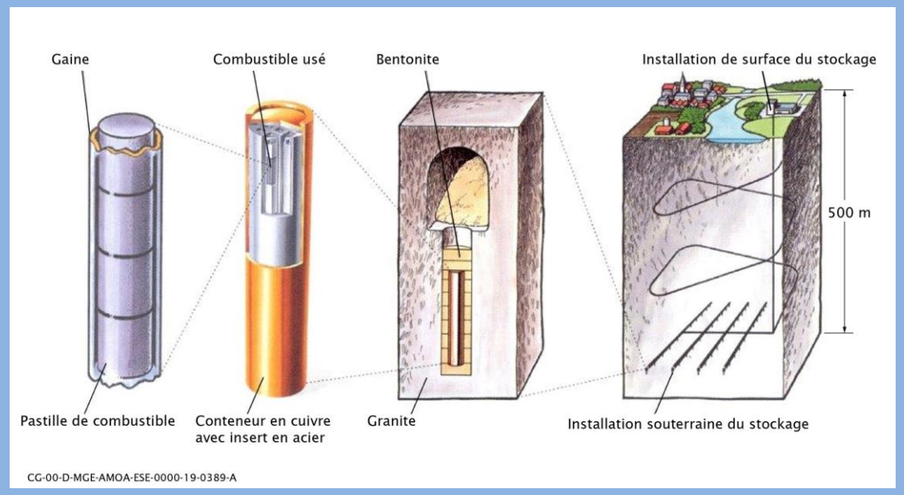


Figure 2-11 *Principes de conteneur et d'alvéole de stockage de combustible usé en Suède et en Finlande*[8]

En France où le contexte géologique est plus varié qu'en Scandinavie, une préférence est donnée par l'Autorité de sûreté nucléaire à ce que la sûreté à très long terme repose sur la barrière géologique plutôt que sur des objets manufacturés (voir le Guide de l'Autorité de sûreté nucléaire n° 1 relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (24)).

Par ailleurs, le retour d'expérience international tend à indiquer la plus grande difficulté à concevoir un stockage géologique de déchets MA-VL dans le granite que dans des roches sédimentaires du fait de la plus forte perméabilité du granite, sachant que l'utilisation de conteneurs de très haute durabilité pour ces déchets de moindre dangerosité ne serait pas une solution proportionnée.

Certains pays comme l'Ukraine envisagent de mobiliser la couverture sédimentaire d'un massif granitique non affleurant pour renforcer le confinement. Paradoxalement la présence d'une couverture sédimentaire sur le site de la Vienne a fortement contribué aux réserves de la CNE sur ce site. Il faut alors que la couverture sédimentaire immédiatement au-dessus du granite soit constituée d'argile.

[8] Source SKB, Suède.

2.2.5 Nature et choix des déchets à entreposer

L'incertitude sur la nature et le volume des déchets, selon que l'on retiendra l'inventaire de référence ou l'inventaire de réserve, interroge quant au périmètre du projet qui, à ce stade, n'aborde pas l'ensemble des déchets qu'il est envisageable de stocker sur le site. Le projet pourrait s'en trouver modifié, qu'il s'agisse de la structure et des techniques adoptées, des modes et itinéraires de transport utilisés, des volumes en jeu, mais aussi de l'échéance de saturation[42]. Cette incertitude interroge aussi quant au risque de « banalisation » de Cigéo en tant que site spécialisé de traitement de déchets hautement dangereux, HA et MA-VL, et quant au risque de réduction des capacités de stockage de ces déchets.

La nature et les volumes de déchets radioactifs qui seront stockés à Cigéo, comme leurs critères d'acceptation, sont des éléments fondamentaux pour établir l'impact environnemental du projet, sa sécurité et son utilité publique. Il est dès lors indispensable que les différents scénarios plausibles soient présentés dans le dossier et que leurs avantages et inconvénients respectifs soient étudiés.

Bien que cet aspect soit déjà traité dans le PNGMDR, la « réduction des volumes à la source » des déchets HA et MA-VL devrait également être prise en compte en écartant les déchets aux activités et aux durées de vies les plus faibles de leur classe.

L'Ae recommande de présenter plusieurs scénarios plausibles et contrastés de définition du gisement de déchets devant être stockés sur Cigéo, d'en analyser les avantages et inconvénients en termes de durée de vie, d'environnement et de sécurité et de justifier le parti retenu.

[42] Il est vraisemblable qu'on ne fera pas de nouveau site de stockage de déchets HA et Ma-VL en France

RÉPONSE DE L'ANDRA AUX RECOMMANDATIONS R16

L'Andra prend acte de cette recommandation et a complété son dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments complémentaires suivants relatifs notamment à l'articulation entre l'inventaire pris en compte pour la conception du projet de centre de stockage Cigéo et d'une part les prescriptions du PNGMDR et d'autre part les scénarios définis dans le cadre de l'Inventaire national (IN) des matières et déchets radioactifs.

La « réduction des volumes à la source » ainsi que l'optimisation du choix des filières de gestion des déchets radioactifs sont des principes fondateurs de la gestion des déchets radioactifs en France.

À cet égard, la décision n° 2015-0508 de l'ASN du 21 avril 2015 précise les règles applicables aux installations nucléaires de base pour la gestion des déchets qu'elles produisent (25). L'exploitant d'une INB doit notamment présenter et justifier, dans une étude sur la gestion des déchets, les dispositions prises pour prévenir et réduire à la source la production et la nocivité des déchets ainsi que les moyens retenus pour réduire par un tri, un traitement et un conditionnement adaptés, la quantité et la dangerosité des déchets à gérer. L'exploitant doit présenter dans le bilan annuel une analyse des déchets produits dans l'installation au cours de l'année civile écoulée. Ce bilan vise à vérifier l'adéquation de la gestion des déchets avec les dispositions prévues par l'étude sur la gestion des déchets et à identifier les axes d'amélioration.

L'article L. 542-1 du code de l'environnement prévoit que les producteurs de déchets radioactifs, dans le cadre de la gestion de leurs déchets avant évacuation vers un exutoire définitif, doivent trier et définir les modes de traitement et de conditionnement des déchets, en fonction des technologies disponibles, dans l'objectif d'en réduire la quantité et la nocivité. À ce titre, les producteurs mettent en œuvre dans leurs installations des dispositions de tri à la source et mènent de nombreuses études

relatives au traitement et au conditionnement des déchets. Compte tenu des coûts afférents à la gestion des déchets radioactifs, des mesures visant à réduire leur production à la source sont prises par tous les exploitants. Par ailleurs, les déchets HA et une grande partie des déchets MA-VL sont produits lors du retraitement du combustible nucléaire irradié, opération visant à en séparer l'uranium et le plutonium qui constituent sa part valorisable.

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs dispose que « *après entreposage, les déchets radioactifs ultimes[9] ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou à faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ». Elle confie à l'Andra la responsabilité « *de concevoir, d'implanter, de réaliser et d'assurer la gestion (...) des centres de stockage de déchets radioactifs* ».

Le code de l'environnement prévoit dans son article D. 542-90 que :« *l'inventaire à retenir par l'Andra pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage prévu à l'article L. 542-10-1 de ce même code comprend un inventaire de référence et un inventaire de réserve ;*

- *l'inventaire de réserve 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.* »

Les inventaires de référence et de réserve retenus pour les études en phase de conception initiale du centre de stockage Cigéo se fondent sur les inventaires prospectifs de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN). Ces inventaires prospectifs sont évalués sur la base de scénarios contrastés d'évolution de la politique énergétique française à long terme répondant aux prescriptions du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) et prennent en compte les orientations de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

L'inventaire de référence correspond à la production des déchets issus du fonctionnement et du démantèlement des installations autorisées aujourd'hui dans un scénario de poursuite de la production électronucléaire avec une hypothèse de durée de fonctionnement des installations existantes de 50 ans, et de retraitement de la totalité des combustibles usés produits par ces installations dans le parc actuel et dans un parc futur. Cette hypothèse ne préjuge pas de la décision des autorités publiques d'autoriser ou non un allongement de la durée d'exploitation des réacteurs. 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).

Conformément au 2e alinéa de l'article D. 542-90 du code de l'environnement susvisé et afin de tenir compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou d'évolutions de la politique énergétique sur la durée de fonctionnement du centre de stockage, l'Andra étudie les adaptations du centre de stockage Cigéo qui seraient nécessaires dans l'éventualité d'un changement de stratégie en matière de politique énergétique afin d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve. Les évolutions de politique énergétique envisageables sont :

- une modification de la durée de fonctionnement des installations nucléaires de base produisant des déchets par rapport à celle prise en compte pour la conception du centre de stockage Cigéo ;
- le déploiement de nouveaux parcs de réacteurs électronucléaires permettant ou non de recycler l'ensemble des matières produites par le parc actuel ;
- le choix de ne pas retraiter certains combustibles usés, impliquant ainsi leur requalification en déchets ;
- la décision d'arrêter globalement le retraitement-recyclage des combustibles usés par exemple en cas de décision de ne pas renouveler la production électronucléaire se traduisant par une requalification de tout ou partie des matières impliquées en déchets.

Ainsi ces incertitudes d'évolution sont prises en compte dans l'inventaire de réserve via deux scénarios :

- l'intégration dans l'inventaire de réserve de déchets qui résulteraient d'un allongement de la durée de fonctionnement d'environ dix ans des réacteurs électronucléaires existants par rapport à celle de 50 ans prise en compte pour établir l'inventaire de référence ;
- l'intégration dans l'inventaire de réserve de la totalité des combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires qui n'auraient pas fait l'objet, selon le calendrier d'arrêt des réacteurs découlant des scénarios de l'Inventaire national[10], d'un retraitement dans les installations actuelles prévues à cet effet, des réacteurs expérimentaux et des combustibles usés de la propulsion nucléaire navale.

Une autre incertitude concerne la mise en place d'une installation de stockage capable de prendre en charge tout ou partie des déchets aujourd'hui affectés au stockage de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). À ce titre, l'inventaire de réserve retenu pour le centre de stockage de Cigéo comprend les déchets FA-VL suivants : les chemises et empilements de graphite, les déchets dits « UNGG de La Hague », certaines familles de colis d'enrobés bitumineux (relevant de la catégorie FA-VL) et les déchets de petits producteurs (sources, paratonnerres et déchets de la Défense nationale). L'Andra joint à son dossier de demande d'autorisation de création de l'INB du centre de stockage Cigéo des résultats des études préliminaires de prise en compte de l'inventaire de réserve afin de vérifier que la conception du centre de stockage retenue pour l'inventaire de référence n'est pas rédhibitoire à un éventuel changement de décision. Les résultats de ces études préliminaires seront synthétisés en particulier dans la pièce « Étude de maitrise des risques[11] » du dossier support à la demande de création de l'INB.

Les mises à jour périodiques du plan directeur de l'exploitation, en concertation avec les parties prenantes et le public, permettent d'adapter le déroulement de référence du projet aux éventuelles évolutions du besoin. Si, au cours de l'exploitation du centre de stockage Cigéo, une décision était prise d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve, un dossier de demande d'autorisation spécifique serait déposé par l'Andra, sur la base en particulier des résultats de la conception détaillée du stockage faisant l'objet de la demande et la démonstration de sûreté associée ainsi que des résultats de l'étude d'impact environnementale.

En matière de gestion globale des déchets, la récupérabilité (c'est-à-dire la capacité à retirer des colis de déchets stockés dans le centre de stockage Cigéo) permettrait aux générations futures de retirer tout ou partie des colis de déchets stockés dans le centre de stockage Cigéo, jusqu'à sa fermeture définitive, si une utilisation ou une autre voie de gestion, encore non-envisagée à ce jour, venait à émerger dans le futur et à se matérialiser en une filière industrielle de gestion.

[9] L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement qualifie de déchets radioactifs ultimes les déchets radioactifs « qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux ».

[10] https://inventaire.andra.fr/

[11] Selon l'article R 593-16, l'étude de maitrise des risques comprendra une présentation des dispositions prévues pour assurer le caractère réversible (dont l'adaptabilité) du stockage ainsi que le prescrit l'article L. 542-10-1.

2.2.6 Choix d'implantation des installations

Les recherches effectuées au sein du laboratoire souterrain ont permis de valider sa faisabilité dans une zone de 250 km² située autour du laboratoire. Au sein de cette zone, les critères d'implantation étaient fondés sur la protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis de l'exposition aux substances dangereuses. Les caractéristiques géologiques du futur site en matière de profondeur, d'épaisseur et d'inclinaison de la couche d'argile et de présence de failles ont été examinées. D'autres critères environnementaux et paysagers ont été pris en compte pour ce qui concerne les installations de surface. A ainsi été privilégiée l'installation en dehors des espaces urbanisés, sous les forêts et à un endroit accessible à une desserte par voie ferroviaire.

La proposition d'accueil du site émanant des deux départements de la Haute-Marne et de la Meuse, il importait de situer la zone descenderie en partie dans la Haute-Marne afin, d'après le dossier, de permettre à la Haute-Marne de continuer d'être associée aux décisions et aux deux départements de bénéficier des retombées fiscales de l'implantation[43]. De fait, le dossier ne mentionne pas d'options préalables au choix d'implantation de la zone descenderie qui tiendraient compte par exemple de la sensibilité de l'environnement ou d'autres possibilités de raccordement ferroviaire. L'Ae s'interroge sur le caractère optimal du choix de sa localisation. Par exemple, une implantation sur la commune d'Houdelaincourt, symétrique de celle qui a été retenue par rapport à la zone puits (cf. figure 10), aurait l'avantage de réduire l'emprise ferroviaire. Elle serait également plus éloignée du fossé de Gondrecourt. Elle ne semble cependant pas avoir été étudiée.

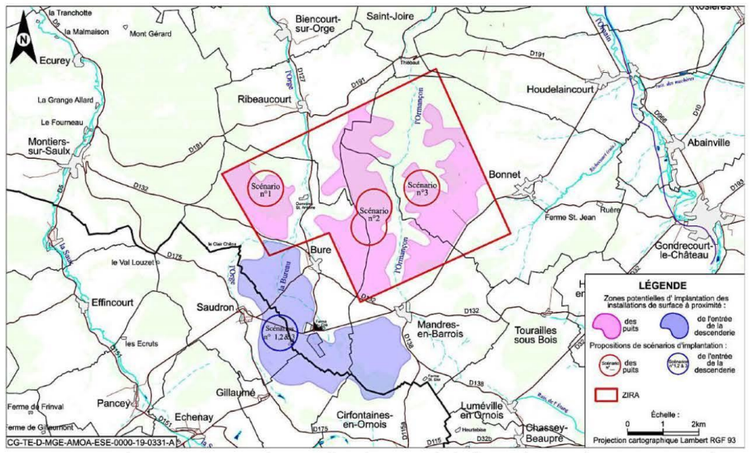


Figure 10 : Carte des options envisagées pour l'implantation de la descenderie et des puits. Source dossier.

L'emplacement de la zone puits a été choisi au sein d'un massif forestier afin de limiter les impacts sur l'agriculture et le paysage. Parmi les options possibles, le bois Lejuc (scénario 1 sur la figure 10) a été choisi de préférence à la forêt de Montiers (scénario 2) ou au bois de la Caisse (scénario 3), bien que le premier ait été classé récemment en Znieff. Ce classement est lié à la qualité de ses habitats pour les chauves-souris et les oiseaux (cf. § 2.3.1.6.2). Plusieurs arguments en faveur du

[43] L'Ae note que le choix d'implantation d'une installation multiséculaire a ainsi pris en compte une limite administrative qui à cette échelle de temps apparaît comme contingente.

bois Lejuc tiennent à la position de la descenderie. Ainsi, une implantation plus à l'est aurait nécessité de traverser l'Ormançon et aurait allongé la liaison intersites. L'Ae a observé au chapitre 2.1.1.5.4 que les études de la biodiversité n'étaient pas encore finalisées pour la déviation de la route départementale D60/960, l'adduction d'eau et le raccordement électrique. Les questions environnementales apparaissent donc comme partiellement prises en compte dans l'examen des solutions de substitution pour l'emplacement des sites du projet.

Au bilan, le choix d'implantation des installations ne prend, selon l'Ae, pas suffisamment en compte les enjeux environnementaux.

L'Ae recommande de reprendre, une fois complétée la connaissance de l'état actuel, la comparaison des incidences environnementales de plusieurs variantes d'implantation des différentes composantes du projet.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R17

L'Andra prend acte de cette recommandation et rappelle ci-dessous la démarche de comparaison des incidences notamment environnementales des variantes d'implantation de l'installation souterraine et des principales installations de surface du centre de stockage Cigéo qui s'est effectuée par étapes entre 2005 et 2014. Le choix de la localisation précise des autres composantes du projet global Cigéo, relevant d'autres maîtres d'ouvrage, se poursuit actuellement et se poursuivra à l'avenir sur la base de ces mêmes critères une fois la connaissance de l'état actuel approfondie.

Les différentes étapes de décision de localisation du centre de stockage Cigéo se sont appuyées sur une comparaison de plusieurs scénarios ou variantes selon des critères sanitaires, environnementaux et d'insertion dans le territoire. En particulier, l'implantation de la zone descenderie (ZD) a été retenue suite à des études et des échanges avec le territoire au cours des années 2008 et 2009, comme détaillé ci-après. Le processus s'est fondé sur plusieurs étapes d'informations et d'échanges réguliers avec le territoire et a été présenté par l'Andra dans un document public : « Stockage réversible profond - Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface » (2010) (26). Ces échanges ont également porté sur un scénario d'implantation de la ZD sur la commune d'Houdelaincourt, qui n'a pas été retenu malgré ses avantages en termes de raccordement aux infrastructures de transport existantes.

Le processus décisionnel a pris en compte la protection de la santé humaine et de l'environnement principalement pour le centre de stockage Cigéo mais aussi plus indirectement pour les autres composantes du projet global. En effet, dans le cadre de la démarche Éviter – Réduire et le cas échéant Compenser, c'est l'implantation du centre de stockage – compte tenu de son ampleur et de ses incidences potentielles – qui offre les possibilités d'évitements les plus significatives, par rapport aux moindres incidences potentielles des autres opérations du projet global. En outre, c'est également l'implantation du centre de stockage qui est la plus contrainte en termes de caractéristiques géologiques du sous-sol.

C'est pourquoi la comparaison des solutions alternatives et de substitution pour le centre de stockage est centrale dans la démarche de conception environnementale du projet global.

En outre, si le site d'implantation du centre de stockage a été retenu au regard de ses enjeux environnementaux (risques naturels, sites Natura 2000, densité d'occupation et activités humaines…), alors ce site est favorable à l'implantation d'ouvrages de moindres impacts potentiels tels que l'alimentation électrique, l'adduction d'eau…

Enfin, le choix d'implantation du centre de stockage préserve des marges de manœuvre très significatives pour les choix d'implantation de l'alimentation électrique, de l'adduction d'eau, mais aussi de la nécessaire déviation de la route départementale D60/960.

Le travail de localisation fine de certaines des autres composantes du projet global Cigéo se poursuit en procédant par comparaison de variantes au regard de leurs incidences environnementales sur la base de la meilleure connaissance de l'état actuel.

Études des variantes d'implantation des installations du centre de stockage Cigéo au regard des incidences environnementales, sanitaires et territoriales

- **2008 : mise en place d'une démarche d'information et de consultation des parties intéressées en vue de la localisation des installations**

L'Andra a commencé par proposer en 2008 une démarche d'information et de consultation au Comité local d'information et de suivi du Laboratoire de Bure (une présentation a été faite en assemblée générale du Clis le 16 octobre 2008 (27)), aux présidents des Conseils généraux, à la Commission nationale du débat public, au Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire, à l'Autorité de sûreté nucléaire, à la Commission nationale d'évaluation et aux préfets. Les échanges entre l'Andra et le Clis ont conduit celui-ci à mettre en place en son sein fin 2008 quatre commissions thématiques : Communication, Réversibilité, Environnement et Santé, Localisation. La démarche a également fait l'objet d'échanges avec l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, le comité d'expertise et de suivi de la démarche d'information et de consultation de l'Andra (Coesdic), le Conseil économique, social et environnemental, les parlementaires de Meuse et de Haute-Marne et les élus locaux.

L'ensemble des parties intéressées se sont alors prononcées pour privilégier en premier lieu la sûreté et donc la préservation de la santé humaine portée par les études de sûreté à long terme, et en conséquence donner la priorité aux critères géologiques pour l'implantation de l'installation souterraine.

- **Janvier - avril 2009 : première séquence de consultation des parties intéressées autour des enjeux de la santé humaine, de l'environnement et de l'insertion territoriale**

Partant du souhait des parties intéressées de prioriser la protection de la santé humaine, l'Andra a exploité les résultats des investigations géologiques qu'elle avait réalisées en 2007 et 2008 pour déterminer la partie la plus favorable à l'implantation du stockage au sein de la zone de transposition présentée en 2005 par l'Andra (au sein de laquelle les résultats des études et recherches menées au sein du Laboratoire souterrain sont transposables). Une zone souterraine optimisant les critères géologiques a ainsi pu être définie (voir figure 2-21 – zone en blanc à l'intérieur de la zone de transposition).

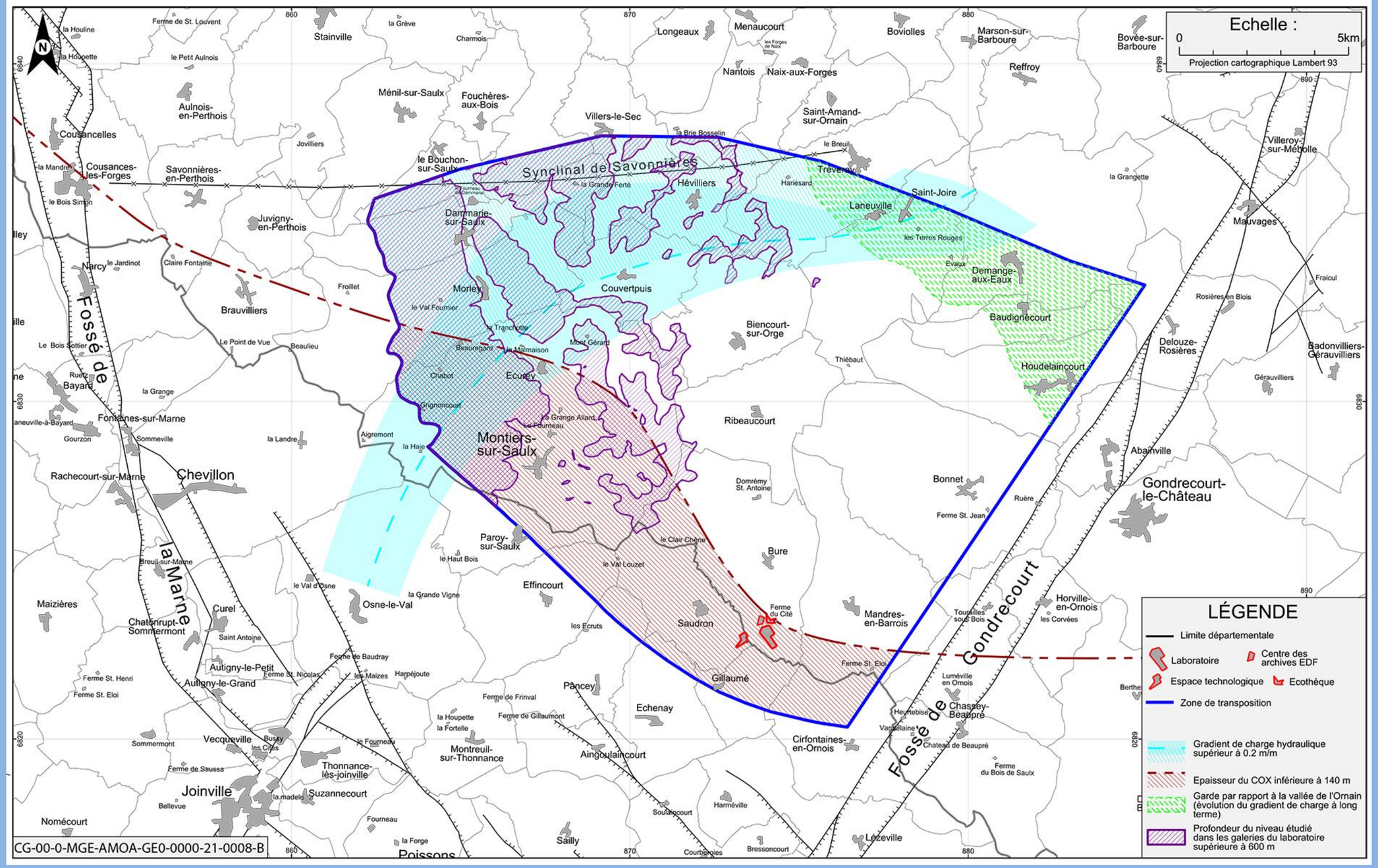


Figure 2-12 Zone souterraine optimisant les critères géologiques au sein de la zone de transposition

En parallèle l'Andra a étudié l'ensemble des possibilités d'implantation des installations de surface offertes par la zone de transposition. L'utilisation potentielle d'une descenderie entre certaines installations de surface et l'installation souterraine a permis d'élargir la zone examinée en surface au-delà de la zone souterraine (périmètre pointillé sur la Figure 2-13 Présentation des possibilités d'implantation des installations de surface sur la base des critères environnementaux).

L'étude des possibilités d'implantation des installations de surface s'est effectuée sur la base des critères environnementaux suivants : préservation de la ressource en eau ; protection de la biodiversité ; protection des paysages ; évitement des zones inondables ; évitement des zones urbanisées et bâtiments isolés. Concernant la biodiversité et les espaces naturels sensibles, trois sites Natura 2000, dont le bois de Demange-aux-Eaux et de Saint-Joire, six ZNIEFF de type 1, dont la vallée de l'Ormançon entre Saint-Joire et Mandres-en-Barrois ainsi que les bois en vallée de l'Ormançon avaient été identifiés en tant que zones particulièrement sensibles à éviter (à l'époque, le bois Lejuc n'avait pas encore fait l'objet d'un classement en ZNIEFF, ce dernier est intervenu en 2016). La vallée de la Saulx avait aussi été identifiée comme paysage remarquable. La proximité des réseaux de transport était aussi prise en compte, ainsi que les risques potentiels pour la sûreté nucléaire (chute d'avion liée à la proximité d'une voie aérienne de survol en basse altitude ; risques naturels ; risques potentiellement induits par l'environnement industriel et les voies de communication…).

Les possibilités d'implantation des installations de surface, qui ont ainsi été étudiées par l'Andra dans une démarche d'évitement de ces enjeux environnementaux, sont figurées en vert à la figure 2-13 présentation des possibilités d'implantation des installations de surface sur la base des critères environnementaux.

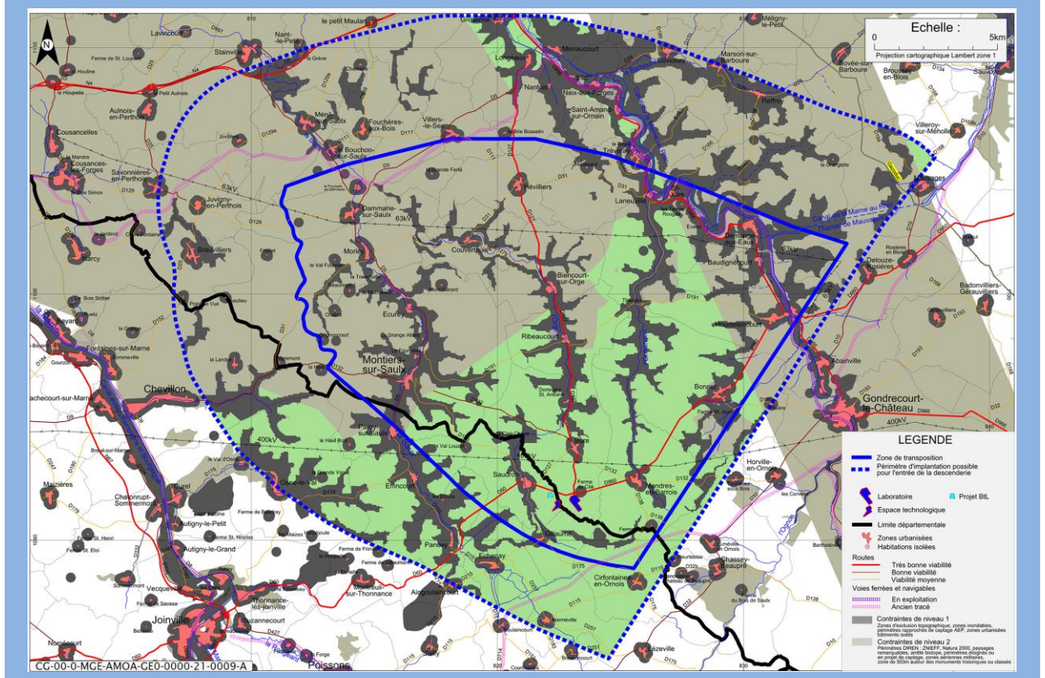


Figure 2-13 Présentation des possibilités d'implantation des installations de surface sur la base des critères environnementaux

Dans le cadre d'une série d'échanges entre janvier et avril 2009, l'Andra a présenté aux parties intéressées la zone souterraine optimisant les critères géologiques, et corollairement la préservation de la santé humaine, ainsi que les possibilités d'implantation en surface prenant en compte l'environnement. Au niveau régional, une présentation du projet a notamment été réalisée en mars 2009 devant la commission « Développement durable – Environnement – Agriculture et Forêt » du Conseil régional de Champagne-Ardenne et en avril 2009 lors d'un comité consultatif citoyen organisé par le Conseil régional de Lorraine. Le projet a également été présenté au Conseil économique et social régional de Lorraine. De nombreuses réunions d'échanges ont eu lieu à l'échelle des communes et des Intercommunalités.

L'ensemble de ces échanges a permis aux acteurs du territoire de formuler des critères complémentaires d'insertion territoriale à prendre en compte pour permettre à l'Andra de déterminer la ZIRA (Zone d'intérêt pour une recherche approfondie) au sein de la zone optimisant les critères géologiques :

- éviter une implantation de la future ZIRA sous les zones urbanisées des villages ;
- privilégier une implantation de la ZIRA sous des zones boisées.

- **Mai - octobre 2009 : poursuite de la consultation autour de scénarios d'implantation (dont un scénario à Houdelaincourt)**

  En ajoutant aux critères sanitaires et environnementaux les critères d'insertion territoriale de la ZIRA formulés par les parties intéressées, l'Andra a présenté aux parties prenantes quatre propositions de ZIRA (cf. Figure 2-14).

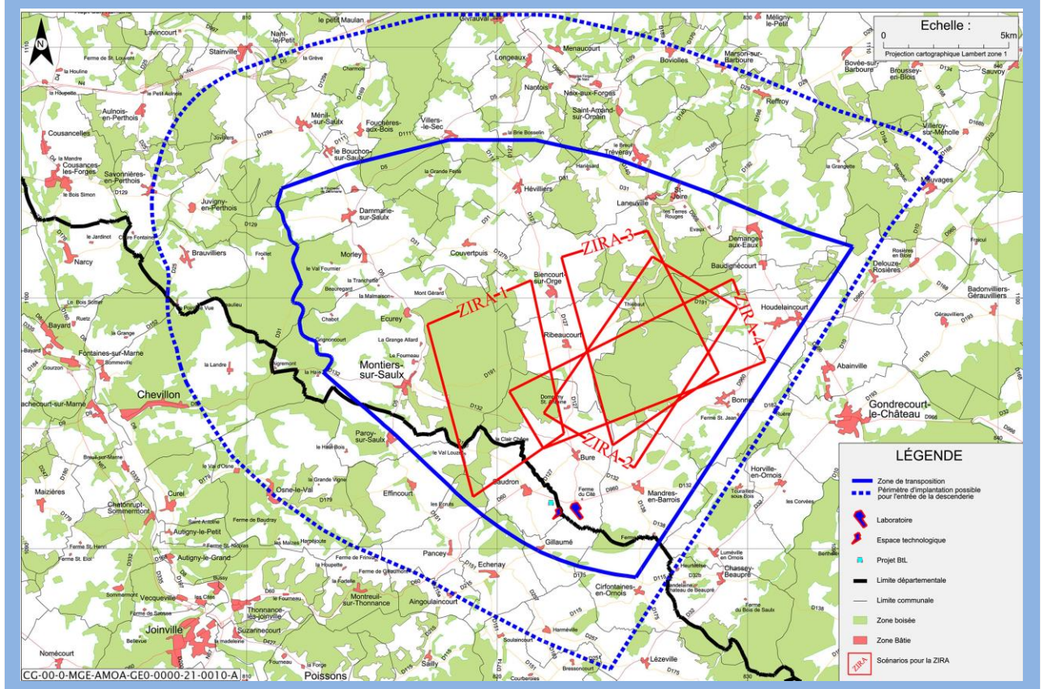


Figure 2-14 Propositions de ZIRA

L'Andra a aussi recherché et étudié les diverses possibilités d'implantation des installations de surface d'une part en tenant compte des critères d'insertion territoriale de la ZIRA et d'autre part en évitant les zones à enjeux environnementaux rappelées ci-avant. Au final l'Andra a proposé plusieurs scénarios favorables d'implantation en surface (zones de couleur mauve sur la Figure 2-15 Scénarios d'implantation en surface).

Parmi ces scénarios, une implantation sur la commune d'Houdelaincourt, a été étudiée par l'Andra. Cette implantation, qui présentait l'avantage d'une plus grande proximité avec le réseau ferroviaire existant, n'a pas été privilégiée par les acteurs en raison notamment de :

- ✓ la proximité de villages et de bourgs urbanisés (plus de 200 habitants [Bonnet] jusqu'à plus de 1 200 habitants à Gondrecourt-le-Château) et de leurs éléments patrimoniaux (église classée à Bonnet) ;
- ✓ la proximité de la zone Natura 2000 de Saint-Joire et la nécessité de traverser l'espace naturel sensible (ENS) de l'Ormançon pour rejoindre la zone puits par une liaison intersites ;
- ✓ la topographie de pentes plus fortes susceptible de générer des risques pour l'installation nucléaire (forte pluie, stabilité des ouvrages de génie civil…) et compliquant la réalisation du raccordement ferroviaire avec la ligne ferroviaire 027000 ;
- ✓ l'éloignement de la ligne 400 kV.

Ce scénario d'implantation sur la commune d'Houdelaincourt faisait lui-même suite à une analyse de plusieurs sites, analyse qui avait écarté les zones situées en bordure immédiate du tracé de la ligne ferroviaire 027000, longeant la route départementale D966. En effet, ces zones constituent un fond de vallée inondable, à enjeu fort de biodiversité et incompatible avec la sûreté nucléaire, ou des zones boisées trop étroites.

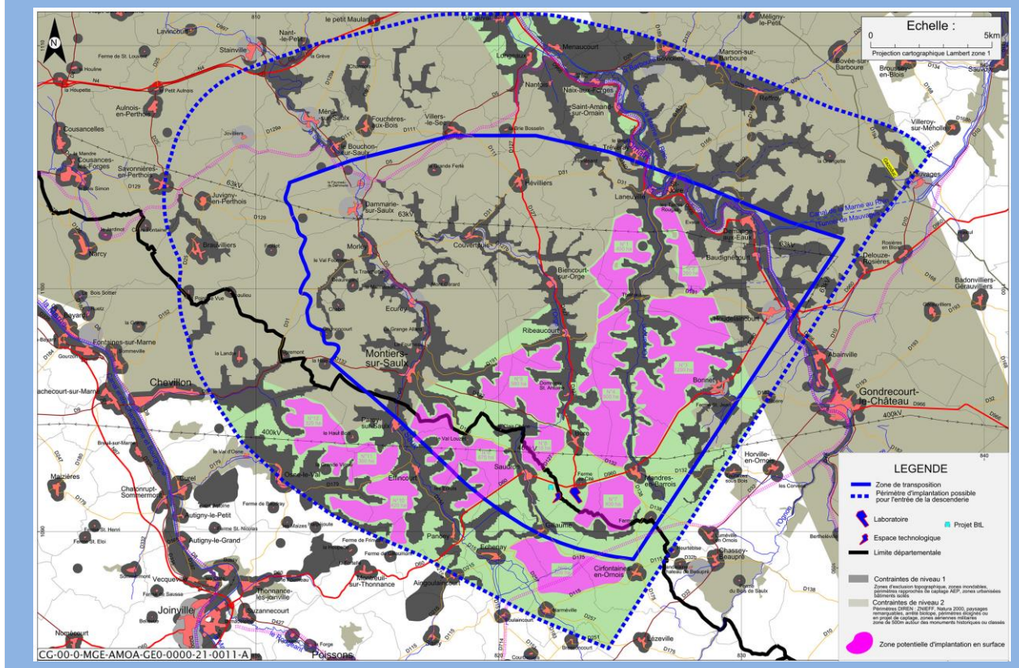


Figure 2-15 Scénarios d'implantation en surface

Ces résultats d'études ont ensuite été à nouveau discutés avec les parties intéressées dans le cadre d'une nouvelle série d'échanges.

Ils ont ainsi été présentés à la commission Localisation du Clis en mai 2009 et en assemblée générale en juin 2009. Le Clis a alors publié ces propositions dans sa lettre de juillet 2009 (28), permettant d'en informer l'ensemble de la population concernée. Dans son avis, la commission « Localisation » a réitéré le souhait de privilégier la préservation de l'Homme et l'environnement pour la localisation de la ZIRA en laissant ouvertes les possibilités de la localisation des installations de surface, avec notamment des avis partagés entre une implantation en forêt ou en terre agricole.

Tout en rejoignant le Clis sur l'importance de privilégier l'Homme et l'environnement, d'autres parties intéressées ont exprimé une demande forte d'aménagement du territoire portant sur l'implantation de l'entrée de la descenderie des colis de déchets dans une zone limitrophe Meuse/Haute-Marne. Ainsi les présidents des Conseils généraux de Meuse et de Haute-Marne ont recommandé en mai 2009 d'implanter « l'entrée principale du futur stockage » dans le périmètre de la zone interdépartementale sur le secteur Bure-Saudron, insistant sur leur volonté commune de poursuivre la coopération des deux collectivités départementales. D'autres parties intéressées ont manifesté un souhait analogue pour l'implantation de l'entrée des descenderies, dont la Chambre de commerce et d'industrie de la Meuse, soucieuse de concilier au mieux le caractère interdépartemental du projet, la Communauté de communes du canton de Poissons (Haute-Marne) et celle de la Haute-Saulx (Meuse).

Pour mémoire, l'ensemble de la consultation est restitué dans le document public : « Stockage réversible profond - Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface » (2010) (26).

- **Fin 2009 : proposition par l'Andra d'une ZIRA issue de la démarche de consultation**

  En tirant les enseignements de cette démarche d'information et de consultation lancée en 2008, l'Andra a proposé au Gouvernement un tracé de la ZIRA majoritairement implanté sous des zones boisées, évitant les zones à enjeux environnementaux identifiés, notamment l'aplomb des zones urbanisées des villages, et compatible avec une implantation potentielle de l'entrée de la descenderie dans la zone limitrophe Meuse/Haute-Marne (cf. Figure 2-16 La ZIRA proposée par l'Andra au terme de la démarche de consultation).

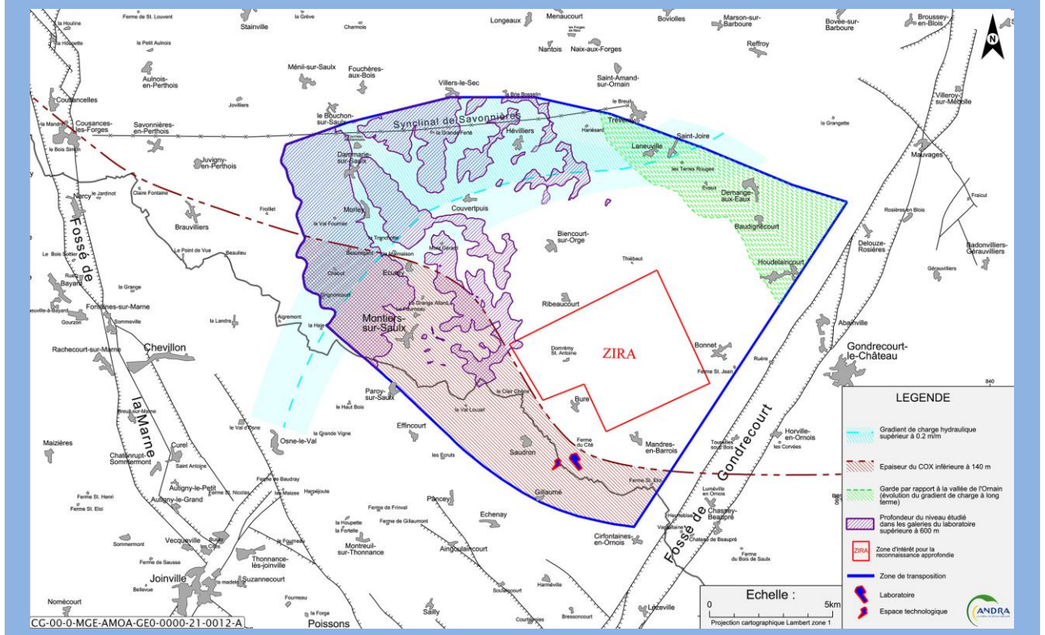


Figure 2-16 La ZIRA proposée par l'Andra au terme de la démarche de consultation

Après évaluation par la Commission nationale d'évaluation (CNE), instruction technique par l'ASN, consultation des élus et du Clis, la ZIRA proposée par l'Andra a été validée par le Gouvernement en mars 2010.

Dans son courrier du 9 mars 2010 au Président de l'Andra (29), le ministre de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer en charge des technologies verte et des négociations sur le climat a demandé à l'Andra de veiller « *à étudier l'implantation de l'entrée de la descenderie pour le stockage dans la zone limitrophe de Meuse/Haute-Marne, conformément au relevé de conclusions de la réunion du Comité de Haut Niveau du 18 novembre 2009* ».

- **2011-2012 : poursuite des échanges avec les parties intéressées sur la localisation des installations de surface du centre de stockage**

  Les échanges se sont poursuivis en 2011 avec les acteurs du territoire, en particulier le Clis, afin de préciser les scénarios d'implantation du projet. Ceux-ci ont ensuite été présentés dans le chapitre 3 du dossier du maître d'ouvrage du débat public sur le projet de centre de stockage Cigéo (30) (voir infra).

  L'Andra a étudié trois scénarios possibles d'implantation de la zone puits à l'aplomb de la ZIRA (cf. Figure 2-17) : dans la forêt de Montiers-sur-Saulx (scénario n° 1) ou dans la partie centrale de la ZIRA (forêt de la vallée de l'Ormançon, scénarios n° 2 et 3).

  Les études ont montré l'intérêt d'éviter d'excentrer les puits par rapport à la ZIRA. En effet excentrer les puits impose d'allonger les galeries souterraines et/ou les descenderies. Cela augmente le volume à excaver et corollairement l'impact environnemental des creusements (volume des verses etc.), sans apporter en contrepartie un bénéfice substantiel pour la santé humaine à long terme. Cela a notamment conduit l'Andra à proposer de ne pas étudier plus avant le scénario n° 1.

  Le Comité de Haut Niveau a validé le 4 février 2013 (31) l'implantation proposée par l'Andra pour la zone descenderie et les deux options à approfondir pour l'implantation de la zone puits (scénario 2 et scénario 3).

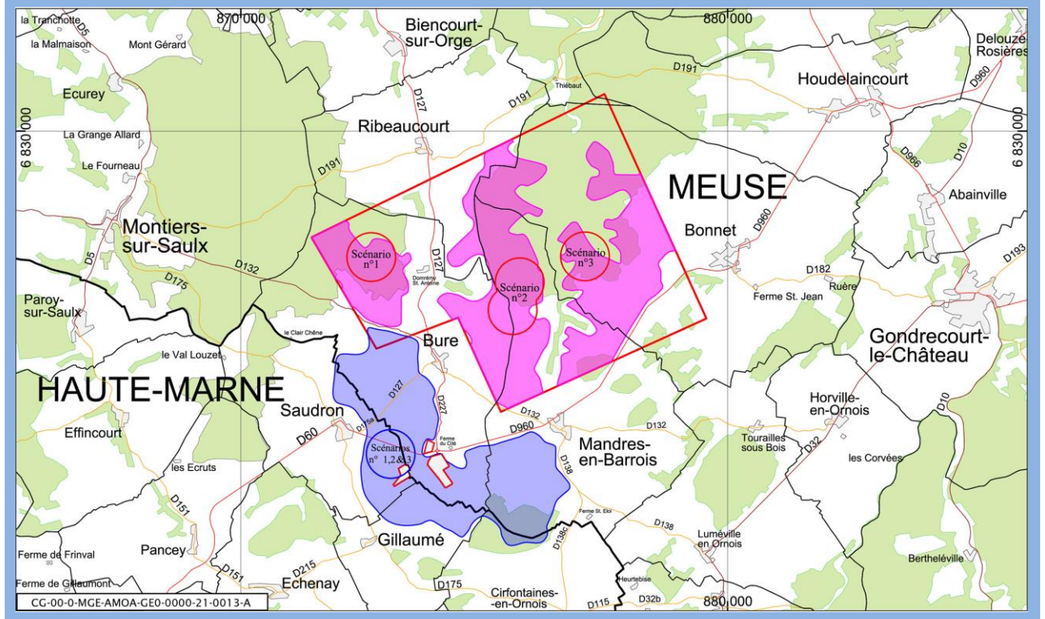


Figure 2-17 *Options d'implantation des installations de surface présentées par l'Andra au débat public de 2013*

- **Mai - octobre 2013 : débat public sur le projet de centre de stockage Cigéo**

  Les scénarios d'implantation n'ont pas soulevé de discussion particulière lors du débat public sur le projet de centre de stockage Cigéo qui s'est tenu de mai à octobre 2013. En revanche une forte demande pour une desserte ferroviaire a été exprimée.

  Dans les suites à donner au débat public (délibération de son conseil d'administration du 5 mai 2014 publiée au journal officiel de la république française le 10 mai 2014 (32)), l'Andra a réaffirmé le double objectif de protection de l'environnement et d'insertion territoriale :

  « Le conseil d'administration de l'ANDRA [...] réaffirme son engagement, dans le cadre du développement de sa politique de responsabilité sociétale (RSE), de rester à l'écoute des acteurs locaux et des habitants de la Meuse et de la Haute-Marne et de veiller, en vue d'une bonne insertion du projet dans le territoire, à ce que la conception, la construction et l'exploitation de Cigéo :

  - ✓ *limitent les impacts sur l'homme et l'environnement et respectent la qualité de vie locale ;*
  - ✓ *favorisent au niveau local le développement de l'activité économique et de l'emploi et contribuent à l'amélioration de l'offre de services. »*

Poursuite de la prise en compte des incidences environnementales pour les choix d'implantation des autres composantes du projet global Cigéo

En complément de l'examen des solutions de substitution raisonnables pour le centre de stockage (exposé au volume II de l'étude d'impact), des études de variantes ont été engagées ou vont l'être pour les opérations des autres maîtres d'ouvrage du projet global. Ces études de variantes comporteront une analyse comparative de leurs incidences sur l'environnement (dont les enjeux de biodiversité). Les résultats de ces études, et des procédures de participation du public à l'élaboration de ces opérations, seront présentés dans les versions actualisées de l'étude d'impact qui seront jointes aux dossiers de demande d'autorisation de ces opérations.

Plus précisément, et en lien avec le pilotage par l'Andra de toutes les études écologiques pour l'ensemble des opérations du projet global Cigéo, l'élaboration des variantes d'implantation des opérations des autres maîtres d'ouvrage repose sur une démarche progressive et appropriée de connaissance de l'état actuel qui donne au stade du présent dossier d'enquête publique préalable à la DUP un niveau de connaissance suffisant des enjeux environnementaux et de la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet global Cigéo :

- des données bibliographiques et de premières analyses de terrain ont permis d'identifier les enjeux environnementaux les plus importants dans une grande zone de recherche de variantes d'implantation, afin de concevoir ensuite des variantes de tracé ou d'implantation évitant autant que possible ces enjeux forts et très forts (telles que zones humides potentielles, corridors écologiques...). Cette recherche de variantes est en cours pour l'opération d'adduction d'eau, pour laquelle la marge de manœuvre pour concevoir des variantes par évitement est très significative puisque seules les sources d'alimentation et l'implantation du centre de stockage sont fixées ;
- la connaissance de l'état actuel de l'environnement est ensuite complétée par des analyses de terrain plus précises (dont inventaires par groupes d'espèces, localisations des zones humides et des corridors écologiques avérés...) dans des fuseaux d'implantation de tracés potentiels - ce complément de connaissance de l'état actuel de l'environnement est en cours pour les opérations d'alimentation électrique, de déviation de la route départementale D60/960 et de mise à niveau de ligne ferroviaire 027000 ; il permettra de comparer les impacts des différentes variantes et solutions de substitution ;
- enfin, la connaissance de l'état actuel sera encore détaillée dans la zone susceptible d'être affectée par la solution retenue après participation du public, pour chacune des opérations des autres maîtres d'ouvrage, par exemple des inventaires faunistiques et floristiques détaillés seront menés à une fréquence minimale de trois ans comme pour le centre de stockage.

2.2.7 Les options de développement du territoire

Le dossier indique les dispositions qui ont été prises en faveur du développement économique et de l'attractivité du territoire. Un projet de développement territorial a été mis en place sous la responsabilité du préfet de la Meuse avec pour objectif de « *profiter de l'opportunité de la création d'un centre de stockage des déchets radioactifs [...] pour mettre en place une stratégie ambitieuse, partagée avec l'ensemble des forces vives du territoire, d'aménagement et de développement économique au bénéfice progressif des deux départements de la Meuse et de la Haute-Marne* ». Une part importante de ce plan est l'œuvre du groupement d'intérêt public « Objectif Meuse », financé par les producteurs de déchets nucléaires.

L'Ae observe que le projet de développement du territoire n'a pas fait l'objet d'options alternatives. Or, compte tenu de la nature du projet et des incertitudes qui portent sur les risques à long terme, il serait rationnel, en application du principe de précaution[44], de chercher à limiter durablement la population exposée à l'aléa, même si celui-ci est très faible. L'analyse des incidences cumulées des différents projets contribuerait à une réflexion plus complète sur cette question.

Une alternative pourrait consister, par exemple, à ne pas développer démographiquement le territoire potentiellement exposé aux risques sanitaires, certes très limités à court terme, mais de plus en plus incertains avec le temps. Cette réflexion prendrait tout son sens à une échelle plus large. Il s'agirait en particulier d'éviter que le développement économique futur, couplé à un possible oubli du stockage, ne s'aventure par méconnaissance dans des usages du sous-sol qui accroîtraient le risque. À tout le moins, il s'agirait de déterminer les conditions d'une compatibilité à long terme entre l'activité de stockage et les autres activités du territoire. Pour l'Ae, il est encore temps d'examiner des options alternatives permettant de coupler diminution de vulnérabilité, réduction des interventions d'origine anthropique, contrôle de la société[45] et préservation de la biodiversité sur un site que le projet rend *ipso facto* exceptionnel en France. À titre d'exemple, l'Ae considère qu'un espace naturel préservé pourrait être une de ces options. La réponse apportée pourrait en outre constituer un fondement de l'utilité publique du projet.

[44] L'Ae a eu l'occasion d'exprimer son interrogation sur l'enjeu de l'application du principe de précaution dans son avis sur le plan local d'urbanisme interurbain de la communauté de communes de la Haute-Saulx. Avis Ae n°2017-11 du 22 mars 2017.

[45] Reprenant à son compte l'analyse de l'Autorité de sûreté nucléaire évoquée au chapitre 2.2.2 à propos de l'entreposage, l'Ae considère qu'il importe de s'assurer qu'un contrôle minimal de la société sera poursuivi pendant la durée de décroissance radioactive des déchets stockés en profondeur.

L'Ae recommande :

- ***de justifier, au regard du principe de précaution et du nécessaire contrôle de la société sur le stockage à long terme, le projet de développement du territoire qui en l'état actuel augmente le niveau d'enjeu face au risque d'exposition à la radioactivité et risque de banaliser le territoire ;***
- ***d'évaluer l'intérêt de solutions alternatives qui permettraient de diminuer le risque à très long terme et, à tout le moins, de déterminer les conditions d'une compatibilité à long terme entre l'activité de stockage et les autres activités du territoire.***

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R18

L'Andra prend acte de cette recommandation et rappelle que le centre de stockage Cigéo est conçu pour n'avoir aucun impact significatif sur la santé des personnes ou sur l'environnement en fonctionnement normal et après fermeture et pour ne pas générer un surcroît de risque inacceptable en cas d'accident. La présence du centre de stockage Cigéo, puis du stockage une fois le centre fermé, ne présente donc pas un obstacle au développement d'activités sur le territoire.

La mémoire collective s'inscrit en outre dans un territoire, qui en est le creuset. Le maintien de l'activité humaine est donc un facteur favorable de préservation de cette mémoire, l'articulation étroite projetée entre le développement territorial et le déploiement du centre stockage renforçant le maintien de cette mémoire.

La sûreté du centre de stockage

Les impacts radiologiques du centre de stockage en fonctionnement normal sont quasiment négligeables et restent limités en cas d'accident (cf. Volume VI de l'étude d'impact, pièce 6 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique). Une fois l'installation fermée définitivement, la protection de la santé des personnes et de l'environnement est assurée de façon passive. Les personnes et l'environnement sont protégés des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir. (cf. Chapitre 18.2 du volume IV de l'étude d'impact). Le choix d'implantation des ouvrages souterrains contenant les colis de déchets radioactifs dans la couche de Callovo-Oxfordien à environ 500 m, ses très bonnes caractéristiques et les dispositions de conception comme les scellements des liaisons surface-fond confèrent une protection des personnes et de l'environnement sur plusieurs milliers d'années.

Par précaution, pour que la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle sont implantés les ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo, reste la ligne de défense robuste pour assurer la sûreté passive après fermeture et à très long terme (cf. Chapitre 2.5.1 du résumé non technique de l'étude d'impact) des mesures de restriction (via l'institution d'un périmètre de protection) sont envisagées sous forme de servitudes d'usage ou de restrictions d'implantation d'installations comme par exemple des forages tiers. Celles-ci seront identifiées et proposées dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création (pièce relative à la demande de servitudes d'utilité publique et de périmètres de protection et de droit exclusif selon l'article R. 593-15 du code de l'environnement). Ces mesures sont des réponses aux analyses détaillées de risques menées, en parallèle des études détaillées de conception dans le cadre du futur dossier de demande d'autorisation de création. Après l'instruction technique approfondie de cette demande et après enquête publique spécifique, ces mesures seront fixées par le décret d'autorisation d'exploitation.

L'objectif de développement économique a fait l'objet d'un consensus politique dans la durée et à différents niveaux.

Ce consensus politique est fort et durable car même avec des sensibilités différentes, les acteurs locaux et nationaux s'accordent sur l'intérêt d'un appui au développement économique pour les territoires qui accueillent l'installation. Ainsi, le choix d'un développement économique du territoire d'implantation du Laboratoire du CMHM et du futur centre de stockage Cigéo a été entériné par plusieurs textes (loi Bataille 91-1381, loi de 2006-739) instituant et pérennisant deux groupements d'intérêt public (GIP): le GIP Objectif Meuse et le GIP Haute-Marne qui redistribuent au territoire des fonds versés par les producteurs de déchets (CEA, EDF et Orano) pour des projets de développement. Cette orientation politique a été confirmée dans la durée d'abord par le SIDT (Schéma Interdépartemental de développement des infrastructures en 2013 puis en 2016 par le CDT (Contrat de développement du territoire). C'est le premier ministre, par lettre en date du 9 juin 2016, qui a

confié au préfet de la Meuse, préfet coordonnateur du projet de centre de stockage Cigéo, la mission d'engager les travaux relatifs à l'élaboration d'un contrat de développement du territoire (présenté aux chapitres 2.3.5 et 2.5.2 du volume II de l'étude d'impact et qui fait l'objet de la pièce 14 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique - SPADET) dans le cadre du projet de centre de stockage Cigéo. Ce contrat de territoire renommé « projet de développement du territoire » (PDT) en 2019 vise à assurer un aménagement territorial structuré autour de quatre axes stratégiques :

- réaliser les aménagements qui permettront ou accompagneront la construction et l'exploitation de Cigéo ;
- dynamiser le potentiel socioéconomique de la zone de proximité ;
- renforcer l'attractivité de la Meuse et de la Haute-Marne par des mesures d'aménagement structurants ;
- pérenniser l'excellence économique et environnementale de la Meuse et de la Haute-Marne.

Il a été signé en octobre 2019, en présence de la ministre déléguée à la Transition écologique, par les 24 partenaires engagés dans sa mise en œuvre : l'État, la région Grand Est, les deux départements de Meuse et de Haute-Marne, le bloc communal qui accueille le projet industriel, les opérateurs de la filière nucléaire (Andra, EDF, CEA, ORANO), les représentants du monde économique local.

Ce projet de territoire participe d'une démarche prudente et itérative qui requestionne la nécessité et la proportionnalité, mais aussi la cohérence des mesures adoptées à l'échelle des territoires concernés à chaque étape du projet global Cigéo. Ainsi, les ambitions de développement économique qu'il affiche restent prudentes, proportionnées et révisables et visent avant tout à l'adaptation au juste besoin des infrastructures matérielles et immatérielles existantes.

Dans ce cadre, tout au long du développement progressif du centre de stockage, lors des réexamens de sûreté, il sera par ailleurs pris en compte les activités autour du centre de stockage comme cela est déjà le cas dans les évaluations, intégrant ainsi les éventuelles nouvelles activités implantées ou prévues.

Le développement humain contribue à la sûreté car celui-ci contribue à maintenir la mémoire de l'installation.

Même si le centre de stockage de déchets radioactifs est conçu pour être sûr de manière passive une fois fermé et donc ne nécessite aucune intervention des générations futures, des actions sont engagées afin de transmettre et de conserver sa mémoire pour les quelques siècles à venir.

Le risque d'oubli du stockage a fait l'objet de nombreuses démarches qui ont toutes conclu que la meilleure mesure de précaution des populations est l'organisation et le maintien de la mémoire, pour empêcher la banalisation du site et du territoire., Le guide de sureté de l'ASN de 2008 (24) recommande de maintenir la mémoire le plus longtemps possible. Ainsi, même si l'installation est conçue pour être sûre en cas de perte de cette mémoire, l'objectif est de conserver et de transmettre la mémoire du site aux générations futures, afin que nos lointains descendants trouvent et comprennent les informations que nous leur aurons laissées sur le centre de stockage Cigéo.

Pour cela, l'Andra développe depuis le démarrage des études de conception des dispositifs pour favoriser la transmission intergénérationnelle des connaissances des déchets et de leur lieu de stockage, considérant ces connaissances comme un patrimoine collectif légué par notre civilisation. Il y a en effet une responsabilité collective à maintenir la mémoire sur plusieurs siècles ou plusieurs millénaires.

En s'appuyant sur le retour d'expérience de la gestion des centres de stockage de l'Andra et en croisant des disciplines aussi variées que l'archéologie des paysages, la linguistique et au-delà, la sémiotique, le vieillissement des matériaux, l'archivistique et les sciences humaines et sociales, l'Andra travaille sur plusieurs pistes associant messages, supports physiques et relais de conservation de la mémoire.

Ces dispositifs visent à maintenir la mémoire du stockage le plus longtemps possible pour éviter toute intrusion involontaire dans le stockage par la méconnaissance de sa présence.

Un archivage des données est mis en place dès maintenant au sein de l'Andra et déployé pendant la construction initiale et tout au long de sa durée de fonctionnement pour tracer la surveillance de l'exploitation du centre de stockage et les éventuels accidents (cf. Chapitre 18.2 du volume IV de l'étude d'impact).

2.3 Analyse des incidences du projet et des mesures d'évitement, de réduction et de compensation

L'analyse des incidences constitue un volume séparé de l'étude d'impact. Sa présentation est de qualité et elle comporte beaucoup d'informations pertinentes. Cependant, si le dossier évoque les possibilités de pollution accidentelle des eaux, la rétention des pollutions en cas d'accident et des eaux d'incendie, il se limite à développer essentiellement les impacts et les mesures de prévention pour les situations en fonctionnement normal. Aucun scénario en mode de fonctionnement dégradé, d'incident ou d'accident (panne de filtre sur les cheminées, longue coupure de courant ou sur le traitement d'eau par exemple) n'est présenté qui conduirait à un rejet ponctuel dans l'environnement avec des conséquences à court et à long terme. Les conséquences à long terme pour les sols d'un éventuel accident d'exploitation ou de chantier ne sont pas non plus exposées. Aucune évaluation des risques sanitaires en situation accidentelle n'est proposée, ni en phase d'exploitation ni pendant la longue période de décroissance de la radioactivité.

L'Ae recommande de compléter le dossier par une évaluation des incidences environnementales et sanitaires à court, moyen et long termes liées aux fonctionnements en mode dégradé ou à l'occurrence de situations accidentelles pendant la phase de fonctionnement du site et ultérieurement.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R19

L'Andra prend acte de cette recommandation et développe ci-dessous des éléments complétant le chapitre 17 du volume IV de l'étude d'impact dans lequel les situations accidentelles radiologiques et non radiologiques sont présentées.

Plusieurs situations accidentelles ont été étudiées par l'Andra. Les incidences de celle, dont les conséquences radiologiques seraient les plus importantes, sont présentées ci-après. Les impacts radiologiques à court terme suite à l'accident ainsi que l'impact résiduel dans les années qui suivent seraient très faibles. Cette situation accidentelle ne nécessiterait pas la mise en place de mesures telles que la mise à l'abri des populations. Les activités massiques des produits agro-alimentaires maximales resteraient largement inférieures aux limites de commercialisation et l'activité massique calculée ajoutée dans le sol serait très faible.

Concernant les accidents pouvant impliquer des composés toxiques ou dangereux, l'Andra présente l'analyse de plusieurs scénarios. Les incidences sur l'environnement et la santé humaine des risques d'accidents impliquant des matières non radiologiques seraient faibles et limitées dans le temps et dans l'espace en phase de fonctionnement ou d'après fermeture.

En ce qui concerne l'évolution du stockage après sa fermeture, l'Andra étudie différents scénarios d'évolution qui permettent de couvrir d'éventuelles déviations par rapport à l'évolution normale, afin de justifier la robustesse du système de stockage.

Méthodologie d'analyse des situations incidentelles et accidentelles

Les fonctionnements en mode dégradé et les situations accidentelles, ainsi que leurs incidences, sont étudiés par l'Andra.

Les situations dites « dégradées » correspondent à des situations du type, par exemple, d'un blocage mécanique d'un transfert de colis de déchets. Dans ces situations, qui sont temporaires, il n'est pas identifié de risques de rejets spécifiques à l'environnement et donc d'incidence environnementale.

Les situations accidentelles radiologiques et non radiologiques sont présentées au chapitre 17 du volume IV de l'étude d'impact du projet global Cigéo du présent dossier de DUP. Les incidences environnementales et sanitaires de ces situations sont présentées ci-dessous pour les accidents étudiés dont les conséquences radiologiques et non radiologiques en dehors de l'installation sont les plus importantes. Les autres accidents conduiraient donc à des conséquences moindres.

Les incidences sanitaires s'entendent comme les incidences sur la santé humaine et les incidences environnementales en situations accidentelles couvrent les incidences sur la qualité des eaux, de l'air, des sols et des produits agro-alimentaires.

L'Andra rappelle qu'outre l'identification des conséquences potentielles en cas d'accident, l'analyse des risques conduit en premier lieu, conformément au principe de défense en profondeur, à la mise en place de dispositions pour prévenir les risques de dissémination, de surveillance et limiter les conséquences en cas de rejets atmosphériques à l'extérieur de l'installation, si ceux-ci ne peuvent être exclus. À l'issue de l'analyse des risques, des situations accidentelles impliquant la dissémination de substances radioactives sont identifiées afin de vérifier que les conséquences sont acceptables au titre des objectifs de protection.

Le concept de défense en profondeur se concrétise en effet pour les installations nucléaires par la mise en place d'une série de niveaux de défense reposant sur les caractéristiques intrinsèques de l'installation, des dispositions matérielles, organisationnelles et humaines ainsi que des procédures destinées à prévenir les accidents puis, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences. Il peut s'agir, pour prévenir les accidents, de dispositions telles que limiter les hauteurs de manutention des colis de déchets, limiter les vitesses de transfert des engins qui les transportent. Ces mesures sont détaillées dans la synthèse des options de sûreté jointe au présent mémoire (cf. Chapitre 3 concernant l'évaluation de sûreté en exploitation). La défense en profondeur est un concept qui s'applique à tous les stades de la vie d'une installation.

Les risques liés à la présence de substances dangereuses sont analysés suivant une approche identique aux risques de dissémination de substances radioactives. Les incidences environnementales et sanitaires sont évaluées ci-dessous.

Pour couvrir la période post-fermeture du stockage, différents scénarios d'évolution du stockage sont étudiés : un scénario d'évolution normale ainsi qu'un ensemble de scénarios permettant de couvrir d'éventuelles déviations par rapport à cette évolution normale, y compris des scénarios jugés très peu probables et des situations d'intrusion humaine involontaire dans le stockage. La méthodologie d'analyse de ces scénarios est précisée au 4.1. de la synthèse des options de sûreté jointe au présent mémoire.

Évaluation des incidences environnementales et sanitaires en situations accidentelles

a) Incidences radiologiques

La situation accidentelle présentée ci-dessous est la situation considérée au stade des options de sûreté. Il s'agit de la situation accidentelle ayant les conséquences radiologiques maximales en dehors de l'installation.

Les situations étudiées au stade des options de sûreté et leurs conséquences sont présentées dans la synthèse jointe en annexe 1 du présent mémoire (paragraphe 3.5).

- **Présentation de la situation accidentelle retenue**

  Il est considéré un incendie du pont stockeur (cf. Figure 2-18) en partie utile d'un alvéole de stockage MA-VL cumulé à une défaillance du colis de stockage impliquant une remise en suspension des substances radioactives contenues à l'intérieur d'un colis primaire.

  Il est par ailleurs postulé d'une part un départ de feu sur un coffret électrique du pont stockeur de l'alvéole de stockage MA-VL qui se propage aux équipements du pont et d'autre part deux défaillances complémentaires cumulées suivantes pour conduire à une dissémination de substances radioactives : le système d'extinction embarqué sur le pont est considéré, de manière conservative, inopérant et le colis perd sa capacité de confiner les substances radioactives. Il y a alors une remise en suspension de substances radioactives dans la partie utile de l'alvéole de stockage MA-VL.

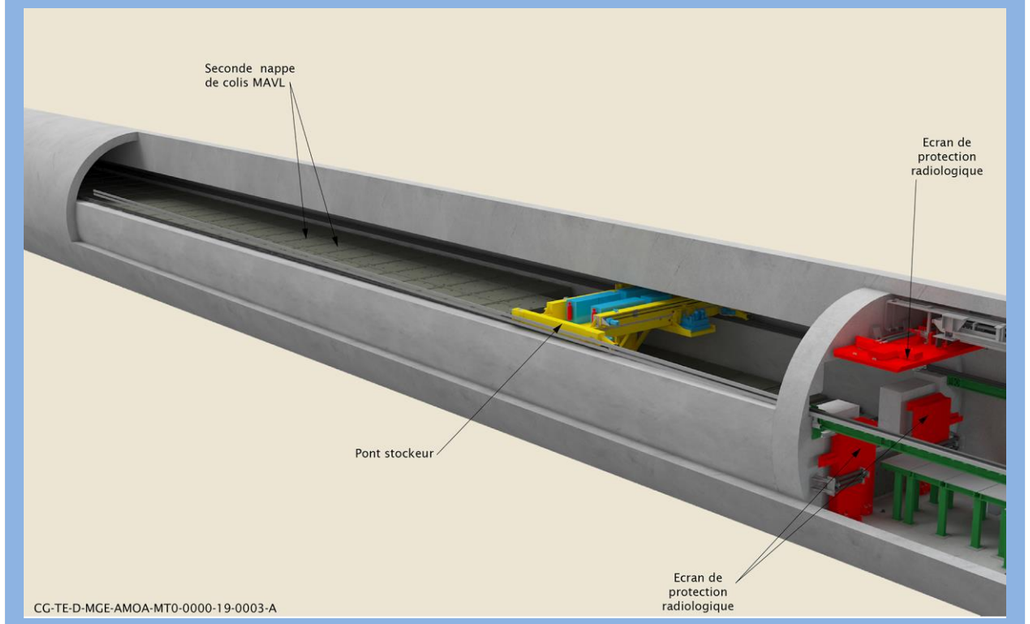


Figure 2-18 Pont stockeur dans la partie d'un alvéole de stockage MA-VL

Sur détection de l'incendie par les systèmes de surveillance présents, la ventilation de soufflage dans l'alvéole est arrêtée par la fermeture des clapets coupe-feu sur le réseau de soufflage de l'alvéole. La ventilation d'extraction est maintenue autant que possible afin de conserver la filtration des substances radioactives éventuellement remises en suspension. La ventilation d'extraction est toutefois stoppée lorsqu'il n'est plus possible de maintenir de bonnes conditions de filtration (en cas de colmatage des filtres par la fumée de l'incendie par exemple). Ensuite, malgré le confinement statique assuré par les parois de l'alvéole de stockage, il est considéré que des substances radioactives pourraient passer à travers cette paroi et se propager via la ventilation des galeries de liaison à la sortie de l'alvéole et être rejetées par l'émissaire de ventilation de l'installation souterraine de la zone puits sans avoir été filtrées.

- **Hypothèses et données d'entrée**

Les principales hypothèses retenues sont :

- la mobilisation des substances radioactives présentes dans un colis primaire ;
- la prise en compte des taux de remise en suspension en cas d'incendie ;
- la hauteur de rejet (émissaire de rejet de la zone puits) : 12 mètres ;

- le relâchement des substances radioactives vers la galerie d'accès est limité par les parois de l'alvéole et de la cellule de manutention : on considère comme hypothèse réaliste que 1 % de l'activité présente dans l'alvéole est dispersée.

La durée de l'accident et donc de rejet est prise égale à 30 min (temps d'intervention).

- **Évaluation des incidences radiologiques de la situation accidentelle sur l'environnement et les populations**

Les calculs de dispersion atmosphérique et de conséquences de situations accidentelles sont réalisés à l'aide du module MITHRA-EA de la plateforme CERES® (Code d'Évaluations Rapides Environnementales et Sanitaires), développée et utilisée par le CEA depuis de nombreuses années et qualifiée par des exercices d'intercomparaisons.

L'étude sur différentes localisations de groupes de population exposés a montré que la localisation potentiellement concernée par l'impact à la population le plus élevé (et qui a donc été considéré dans les études) est, pour un rejet de l'émissaire de l'installation souterraine au niveau de la zone puits, le village de Bure localisé à 2 km de l'émissaire. Aussi, les résultats sont présentés à la localisation de Bure. Les autres localisations seraient donc concernées par des impacts moindres.

- **Impact radiologique sur les populations**

Dose reçue à court terme (24h)

La dose reçue à court terme lors d'un éventuel passage du panache à Bure en situation accidentelle, pour une condition météorologique défavorable, stable, limitant la dispersion et donc concentrant les émissions et dépôts, est très faible (égale à quelques micro sieverts) et correspond principalement à une exposition par inhalation. L'exposition liée aux dépôts est inférieure à l'exposition par inhalation. Elle est principalement due au césium 137 (^{137}Cs), au strontium 90 (^{90}Sr) et dans une moindre mesure aux actinides (américium 241 notamment). Cette dose calculée reçue au moment de l'accident est environ un millier de fois inférieure à la dose de 10 mSv qui correspond à la valeur à partir de laquelle les premières mesures de protection vis-à-vis des populations sont recommandées (mise à l'abri des populations). Les conséquences sont donc très inférieures aux seuils qui nécessiteraient la mise en œuvre de telles mesures.

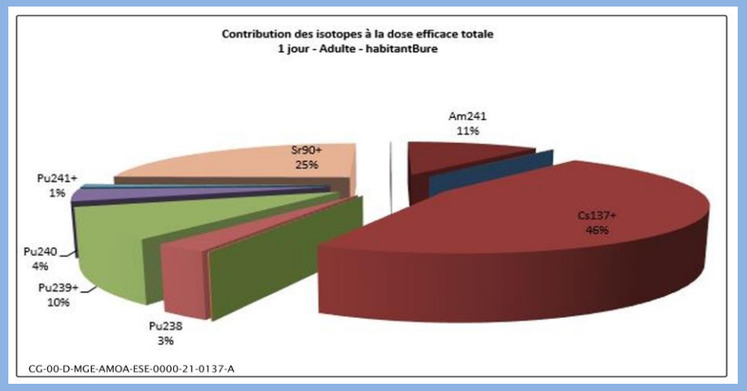


Figure 2-19 Contribution des isotopes à la dose à court terme (Bure, Adulte, F3)

Dose reçue à moyen terme (un an) et dose annuelle à plus long terme

La dose à moyen terme (un an) est d'environ 0,3 mSv. Elle est principalement due au césium 137 (^{137}Cs) (cf. Figure 2-20), à la fois par exposition externe au dépôt et via la dose directe par ingestion de produits végétaux et animaux.

Concernant l'exposition interne par ingestion de végétaux et de produits animaux, deux « voies » sont prises en compte : la voie dite « directe » et la voie dite « indirecte ». La voie directe concerne les végétaux qui ont été contaminés par voie foliaire, c'est-à-dire par le dépôt sur les feuilles ou la partie consommée des végétaux lors du passage du panache, alors que la voie indirecte concerne les végétaux contaminés par les racines, c'est-à-dire par transfert de l'activité déposée sur le sol. Pour les produits animaux, la voie directe correspond à la contamination de ces produits suite à l'ingestion, par les animaux, de végétaux contaminés par voie foliaire et la voie indirecte à l'ingestion de végétaux contaminés par transfert racinaire.

La dose dite « à un an » correspond à la dose reçue, pendant l'accident, lors du passage du panache à laquelle est ajoutée la dose due par la suite à l'exposition externe aux dépôts et à l'ingestion de produits végétaux et animaux.

Par la suite, on calcule une « dose annuelle maximale ajoutée ». Pour un adulte habitant Bure, exposé aux seuls dépôts résiduels après le passage du panache, elle est de 0,16 mSv/an (dose par exposition externe aux dépôts), et de 0,14 mSv/an (dose indirecte par ingestion de produits végétaux et animaux), soit au total environ 0,3 mSv/an. Après l'accident, c'est la dose par exposition externe aux dépôts qui prédomine donc avec deux radionucléides contributeurs à la dose : le césium 137 (^{137}Cs) et le strontium 90 (^{90}Sr).

L'article R. 1333-93 du code de la santé publique fixe le niveau de référence d'exposition d'une personne à des substances radioactives résultant d'une situation d'urgence radiologique à 20 mSv en dose efficace au cours de l'année qui suit la fin de la situation d'urgence radiologique. Ce niveau de référence est réévalué chaque année afin d'atteindre, à terme, 1 mSv en dose efficace sur une année, ajouté au niveau de radioactivité existant antérieurement à la situation d'urgence radiologique. Dans le cas des situations accidentelles étudiées pour le centre de stockage Cigéo, les incidences sont en-dessous de ces seuils. Pour rappel, la dose induite par le bruit de fond radiologique en France est en moyenne de 2,9.

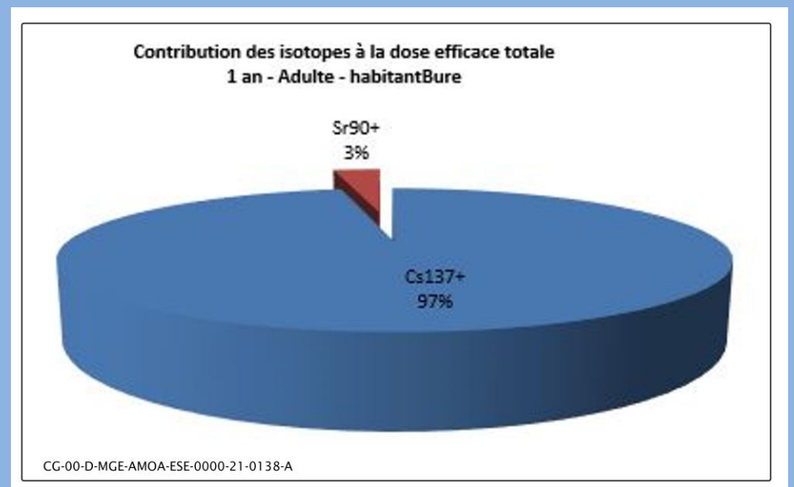


Figure 2-20 Contribution des isotopes à la dose efficace totale à moyen terme (Adulte, Bure, F3)

- **Impacts sur les produits agroalimentaires**

Au niveau européen, en cas d'accident nucléaire, le règlement EURATOM 2016/52 du conseil du 15 janvier 2016 (55) fixe des niveaux maximaux admissibles (NMA) de contamination des denrées alimentaires après un accident nucléaire. Les NMA sont des niveaux préétablis permettant la commercialisation des aliments.

Tableau 2-4 Niveaux maximaux admissibles pour les denrées alimentaires (Bq/kg)

Niveaux maximaux admissibles pour les denrées alimentaires Bq/kg ou Bq/L	Produits laitiers	Autres denrées alimentaires à l'exception de celles de moindre importance
Isotopes de strontium, notamment ^{90}Sr	125	750
Isotopes d'iode, notamment ^{131}I	500	2000
Isotopes de plutonium et d'éléments transuraniens à émission alpha, notamment ^{239}Pu et ^{241}Am	20	80
Tout autres nucléides à période radioactives supérieure à dix jours, notamment ^{134}Cs et ^{137}Cs	1000	1250

Les activités massiques des produits agro-alimentaires maximales à Bure dans le cas de la situation accidentelle étudiée, calculées à l'aide du module MITHRA de la plateforme CERES, sont inférieures aux limites de commercialisation quel que soit le produit considéré. Les résultats pour les deux principaux radionucléides contributeurs, le césium 137 (^{137}Cs) et le strontium 90 (^{90}Sr), et pour le produit le plus impacté (salade) sont présentés pour la condition météo la plus défavorable, en conditions d'atmosphère stable et une vitesse de vent de 3 m/s (cf. Tableau 2-4).

- **Dépôts surfaciques au sol**

  L'activité massique calculée ajoutée dans le sol est très faible. Elle est inférieure au Bq/kg pour tous les radionucléides. Pour le césium 137, l'activité massique dans le sol calculée ajoutées dans le sol est de 11 Bq/kg.

  Ces concentrations dans les sols sont négligeables par rapport au bruit de fond existant de 0,2 à 0,9 Bq/kg en uranium 239 et 240 et de 14 à 36 Bq/kg en césium 137 sur l'aire d'étude rapprochée de l'étude d'impact (DUP Étude d'impact Volume III).

  De plus, ces activités massiques dans les sols vont décroître avec la période radioactive.

  La dose due à ces dépôts au sol dans le cadre de l'accident étudié est très faible (inférieure au µSv) et essentiellement due aux émetteurs beta (césium 137 et strontium 90) par exposition externe aux dépôts, la dose due aux émetteurs alpha étant essentiellement reçue lors du passage du panache par inhalation (pas de dose suite aux dépôts par la suite).

b) Incidences non radiologiques

Deux événements sont considérés comme accidents enveloppes en termes d'éventuelles incidences notables sur l'environnement et la santé humaine pour les phases de construction initiale et de fonctionnement. Il s'agit de :

- ✓ la fuite sur un camion de livraison de carburant ;
- ✓ l'explosion des produits dédiés aux opérations de creusement pendant la phase de construction initiale.

- **Présentation des événements accidentels**

  Fuite sur un camion de livraison

  La fuite sur le camion de livraison de carburant, d'une contenance d'une quinzaine de mètres cubes (cf. Figure 2-21), conduirait à l'épandage au sol de produits chimiques. En présence d'une source d'ignition, cette fuite pourrait être à l'origine d'un incendie ou d'une explosion. Sous une forme aggravée, cette situation pourrait conduire, si la citerne est prise dans l'incendie, à sa rupture et à la formation d'une boule de feu. Un tel accident pourrait survenir lors de manœuvres au niveau des parkings, sur les voies de circulation vers les installations ou encore lors de l'opération de dépotage dans les cuves de stockage (d'une contenance d'une quinzaine de mètres cubes également).

Figure 2-21 Photographie d'un camion-centre de livraison de carburant

Explosion des produits dédiés aux opérations de creusement des puits en phase de construction

L'événement accidentel pourrait survenir lors du transport des produits, dont des explosifs, dédiés aux opérations de creusement jusqu'au local d'entreposage des explosifs de la zone puits, pendant son stockage dans le local ou lors de son utilisation pour le creusement (arrivée aux dépôts en surface, transfert au local de préparation des charges, transfert au front de creusement). Les principales causes de ce type d'accident sont d'origine humaine : mauvaises conditions d'entreposage, erreur dans la manipulation des explosifs, accident de circulation. Elles peuvent également être liées à une agression externe.

- **Évaluation des incidences sur l'environnement et la santé humaine des scénarios accidentels pouvant survenir suite aux deux évènements précités.**

  Épandage de carburant

  En cas de déversement de carburant (une quinzaine de mètres cubes) suite à un accident ou à une fuite sur la voie publique, dont la probabilité d'occurrence est en outre très faible, l'intervention rapide des secours prévus dans le cadre de la procédure d'alerte et de secours permet d'éviter des incidences notables sur l'environnement et la santé humaine.

  Sur les installations du centre de stockage Cigéo, un ensemble de mesures permet de prévenir les épandages de produits polluants : la vérification de la conformité réglementaire des citernes, l'inspection et la maintenance périodique des installations et équipement sont programmées régulièrement. Les postes de garde assureront un contrôle systématique des camions citernes. À l'intérieur du site, un cheminement spécifique est prévu et les règles de circulation internes devront être respectées par les transporteurs. Ces derniers seront également soumis à une procédure sécurisée pour le déchargement (arrêt moteur, camion immobilisé, mise à la terre, supervision, etc.).

  Si malgré ces mesures un accident survenait, la circulation serait bloquée et le déchargement serait arrêté.

  Par ailleurs, les installations du site sont conçues pour éviter tout rejet des eaux pluviales directement dans le milieu naturel et toute infiltration non maîtrisée dans les sols. En effet, l'imperméabilisation

des parkings et des voieries, la mise en place systématique d'aires de dépotage étanches avec séparateurs d'hydrocarbures, la collecte et le traitement des effluents et des eaux pluviales permettent de prévenir toute infiltration et de maîtriser les effets d'une éventuelle infiltration dans les sols en cas de déversement accidentel. En complément, des moyens mobiles pour contenir les épandages pourraient être déployés si nécessaire (absorbant, sacs de sable).

Les eaux pluviales potentiellement polluées ou les pollutions accidentelles par temps sec seraient collectées dans le réseau d'eaux pluviales et dirigées vers un premier bassin, étanche. Ce bassin a pour fonction de confiner toutes les pollutions pour traitement. Le réseau et le bassin sont également dimensionnés pour faire face à une pluviométrie exceptionnelle, c'est-à-dire qu'ils peuvent collecter et contenir un volume d'eau tel qu'il n'en tombe statistiquement qu'une fois tous les 100 ans à minima. À l'exception de la zone des verses où ce n'est pas nécessaire (notamment, pas de circulation d'engin de transport de matières dangereuses), le bassin de traitement en amont du bassin de régulation est dédoublé : ainsi, l'ensemble du système permet de gérer une pollution accidentelle importante, même durant des événements pluviaux extrêmes.

Ensuite, une fois les pollutions traitées et/ou évacuées, les eaux du bassin qui présentent des caractéristiques physico-chimiques compatibles avec un rejet dans le milieu naturel, sont dirigées vers un second bassin, également étanche. Son rôle est de réguler le débit de rejet vers les cours d'eau environnants.

Par conséquent, une pollution accidentelle sur le site n'atteindrait pas l'environnement et les cours d'eau situés à proximité du site.

Incendie de carburant

En cas d'incendie de carburant (une quinzaine de mètres cubes), à l'intérieur du site les installations potentiellement atteintes par le rayonnement thermique ont été dimensionnées vis-à-vis de ce risque et sont résistantes aux effets thermiques reçus. Les effets thermiques liés au rayonnement des flammes seraient limités à une dizaine de mètres au-delà des abords des voiries et, en tout état de cause, ne pourraient pas être ressentis au niveau des bâtis à l'extérieur du site. L'implantation des ouvrages sur le site prévoit des distances de sécurité par rapport au cheminement des citernes de carburant, afin de prévenir une propagation de l'incendie aux installations voisines (par exemple : plusieurs dizaines de mètres entre le cheminement des camions et les bâtiments conventionnels puis les premiers boisements naturels, l'éloignement des installations ICPE, telles que les chaufferies, des clôtures du site).

Des mesures de lutte contre l'incendie sont prévues et seront disponibles à tout moment sur le site afin d'en limiter les effets : une caserne de pompiers est implantée sur chacune des zones du centre de stockage Cigéo pour intervenir rapidement et des poteaux incendie sont disposés le long de toutes les voieries et autour des ouvrages.

Un panache de fumées pourrait se former suite à l'incendie mais s'élèverait vite en raison de la température et se disperserait en altitude. Les effets toxiques en altitude seraient alors restreints au panache visible et se dissiperaient en quelques heures après la fin de l'incendie. Le site étant situé en milieu ouvert, la dispersion serait assurée rapidement. En cas de pluie intervenant pendant l'incendie ou peu de temps après, une partie de la pollution des fumées pourrait être rabattue au sol et pourrait avoir un impact sur la qualité des sols et des eaux de surface. Toutefois, compte tenu de la quantité réduite de polluants contenus dans les fumées et de la durée limitée de l'incendie, cette incidence serait très localisée et limitée dans le temps.

Un incendie de carburant sur le site n'aura ainsi qu'une incidence temporaire sur l'environnement : dispersion de fumées, le temps d'éteindre le feu.

Explosion de vapeurs de carburant

L'explosion de vapeurs de carburant générerait un souffle qui se propagerait sous la forme d'une onde de pression aérienne. Celle-ci pourrait générer des projections (par exemple bris de verre). Cette surpression s'atténue avec l'éloignement, ainsi l'effet de surpression resterait limité à une cinquantaine de mètres aux abords des voiries. Aucun effet ne serait ressenti à l'extérieur du site.

Par ailleurs, à l'intérieur du site, les installations potentiellement atteintes par l'onde de choc ont été dimensionnées vis-à-vis de ce risque et sont résistantes à la surpression reçue.

Une explosion de vapeurs de carburant n'aura pas d'incidence sur l'environnement et sur la santé humaine hormis la génération d'un panache de fumées temporaire lié à l'inflammation qui s'en suivrait.

Explosion d'explosifs dédiés aux opérations de creusement

L'acheminement des explosifs jusqu'à leur local d'entreposage sur la zone puits est soumis aux prescriptions de l'accord européen ADR, qui encadre le transport de matières dangereuses par voie routière. Ces préconisations portent notamment sur la signalisation des véhicules, les équipements de sécurité à bord des camions de transport, le protocole de sécurité du chargement/déchargement. Cette réglementation ADR est appliquée pour le transport sur la voie publique mais aussi à l'intérieur du site. De fait, les véhicules de transport des explosifs sont dédiés et auront été au préalable autorisés au transport des explosifs (selon leur nature et la quantité transportée : véhicules de type EX I, EX II ou EX III).

Sur la zone puits, l'entreposage des explosifs est réalisé dans un bunker dimensionné pour cette fonction. Il pourra ainsi contenir les effets de surpression d'une explosion éventuelle à l'intérieur. Il est par ailleurs implanté à une distance de sécurité des autres sources de dangers (citernes de carburant par exemple) présentes sur le site.

Les accidents pyrotechniques qui pourraient se produire lors du creusement des puits ou des recoupes des descenderies sont des explosions. Les effets engendrés par ce phénomène sont des ondes de surpression pouvant conduire sur le centre de stockage à des dégâts sur les structures et des effets significatifs sur l'environnement dans un rayon de 150 m environ. Compte tenu de l'éloignement, l'onde de pression aérienne ne serait pas significative à l'extérieur du site et n'aurait aucun impact sur le sol et l'eau.

Concernant les zones naturelles sensibles en dehors du site, les effets se limiteraient à un effarouchement ponctuel, de très court terme, de la faune, sans pour autant mettre à mal les fonctionnalités écologiques des habitats. En outre, l'organisation des chantiers prévoit une adaptation des périodes de travaux spéciaux. En construction, les tirs d'explosifs devront prendre en compte la période de reproduction de l'avifaune, avec un début de réalisation des puits en juillet et un début de l'utilisation de l'explosifs à l'automne.

Enfin, un ensemble de mesures de prévention et de protection sont prévues afin de diminuer la probabilité d'occurrence d'une explosion (diagnostics pyrotechniques, habilitation et sensibilisation du personnel autorisé à les employer) et de limiter l'intensité des vibrations (réduction en masse de chaque charge, utilisation divisée dans le temps).

L'ensemble de ces dispositions permettra d'éviter toute incidence notable sur les populations d'un accident de transport de matières dangereuses sur le site du centre de stockage Cigéo.

Scénarios d'évolution du stockage après fermeture

Des scénarios de sûreté après fermeture sont définis pour étudier et justifier la robustesse de la démonstration de sûreté du stockage. Ils sont utilisés pour réaliser des évaluations quantitatives de la performance des dispositions mises en place vis-à-vis de la protection de l'homme et l'environnement.

Les scénarios de sûreté après fermeture sont regroupés en quatre classes génériques :

- un scénario d'évolution normale qui vise à représenter le stockage tel que conçu en tirant partie de l'état de la connaissance scientifique et technologique acquis sur les comportements du Callovo-Oxfordien et des composants du stockage à long terme une fois fermé. Il vise à vérifier le bon fonctionnement du stockage dans le temps ;
- un ensemble de scénarios qui permet de couvrir différentes déviations de cette évolution normale :
  - ✓ des scénarios « d'évolution altérée » représentatifs d'événements ou processus jugés peu vraisemblables au regard de l'état de la connaissance. Se rangent dans cette classe les scénarios correspondant à des pertes de fonctions des composants du système de stockage (exemple des scellements) ; pour ces scénarios, les impacts déterminés au stade du DOS sont du même ordre que pour le scénario d'évolution normale ;

- ✓ des scénarios qualifiés de « What-if » reposant sur un caractère très peu vraisemblable des événements pris en compte, ou reposant sur des événements postulés pour considérer par exemple la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté. Ces scénarios hypothétiques permettent de « pousser » à l'extrême certains dysfonctionnements et de montrer la robustesse du système de stockage dans sa globalité ;
- ✓ les scénarios d'intrusion humaine involontaire, nommés SIHI, dans la zone d'implantation des ouvrages de stockage, par méconnaissance de son existence. Malgré la faible probabilité d'occurrence de tels événements du fait de la conception même du stockage géologique profond, leurs conséquences sont examinées.

Les incidences liées à l'ensemble de ces scénarios sont présentées dans la synthèse des options de sûreté jointe au présent mémoire (cf. Chapitre 4.5 de l'annexe 1).

2.3.1 Milieux naturels et physique

2.3.1.1 Émissions de gaz à effet de serre

Le dossier évalue la production et la consommation d'énergie à l'échelle de la région Grand Est et localement du Pays Barrois. Le dossier s'appuie sur la méthode du bilan carbone de l'Ademe pour calculer le niveau d'émissions de la phase de construction et de fonctionnement soit 11 Mt eq CO_2 pour un siècle.

Le dossier analyse également l'impact du projet sur la séquestration du carbone. Ce bilan est qualitatif et tient compte du fait que la surface boisée totale du site en phase de fonctionnement représente 34 % de la surface boisée initiale de 258 ha. Il est indiqué, sans autre précision, que les mesures de compensation environnementale sur les milieux boisés et prairiaux, ainsi que les mesures de compensation forestière « *contribuent à favoriser la séquestration du carbone* ». Plusieurs mesures d'évitement et de réduction sont présentées comme la sobriété énergétique, le recours aux énergies renouvelables, l'utilisation d'engins hybrides, l'utilisation de fluides frigorigènes à faible effet de serre, l'optimisation de la gestion des déchets. Leur apport n'est en général pas quantifié.

Le bilan total après mesures d'évitement, réduction et compensation est cependant fourni. Il est estimé à 10 Mt eq CO_2 sur l'ensemble du cycle du projet de sa conception à sa fermeture à horizon de 150 ans. Le dossier ne fournit cependant pas les détails de ce calcul.

Mais il faut aussi tenir compte de la dimension nationale du projet. Il permet d'apporter une solution pour les déchets les plus dangereux produits par l'industrie nucléaire. Les émissions de gaz à effet de serre devraient être analysées à l'échelle de l'ensemble du projet, mais aussi au regard de celles de la filière nucléaire.

L'Ae recommande de porter l'analyse des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du projet, mais aussi au regard de celles de la filière nucléaire.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R20

L'Andra prend acte de cette recommandation et rappelle que l'étude d'impact comprend une estimation des émissions de gaz à effet de serre. Pour la bonne information du public, l'Andra complète cette thématique par des éléments d'analyse comparés au regard de la filière nucléaire. Le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo a été mis à jour.

Comme indiqué dans l'étude d'impact pièce 6 du présent dossier de demande de déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, volume IV gaz à effet de serre, chapitre 2.3.5, le bilan carbone total du projet global Cigéo, après mesures d'évitement, réduction et compensation est de l'ordre de 10 Mt eq CO_2, de la conception à la fermeture du centre de stockage Cigéo.

La majorité des déchets à stocker dans le centre de stockage Cigéo, plus de 90 % des déchets HA et plus de la moitié des déchets MA-VL, sont directement liés à la production électronucléaire. Les déchets HA sont principalement issus du retraitement du combustible usé. Les déchets MA-VL sont majoritairement constitués de :

- déchets de structures métalliques entourant les combustibles (coques et embouts) issus du retraitement du combustible usé ;
- dans une moindre mesure :
  - ✓ de déchets technologiques liés à l'usage et à la maintenance des installations nucléaires ;
  - ✓ des déchets issus du traitement des effluents liquides ;
  - ✓ des déchets activés ayant séjourné dans les réacteurs nucléaires.

Sur la base des données publiques de RTE, l'Andra estime que la production électrique du parc électronucléaire pris en compte pour la définition de l'inventaire de référence des déchets destinés au centre de stockage Cigéo est de l'ordre de 20 000 TWh. Cette production électrique correspond à une production annuelle moyenne du parc électronucléaire d'environ 400 TWh sur la durée de 50 années de fonctionnement retenue comme hypothèse pour la détermination de cet inventaire.

Les émissions de CO_2 liées à la production électrique du parc électronucléaire français sont estimées entre 6 et 11 g de CO_2 par kWh (sources : base Carbone de l'ADEME et version 3.6 de la base Ecoinvent utilisée pour les analyses de cycle de vie). Le bilan carbone total de la production électronucléaire sur 50 ans est compris selon ces chiffres entre 120 et 220 Mt eq CO_2.

Le bilan d'émissions de gaz à effet de serre du projet global Cigéo représente moins de 4 à 9 % du bilan carbone de la production d'électricité d'origine nucléaire.

2.3.1.2 Qualité de l'air

Les principales incidences sur la qualité de l'air sont liées aux travaux de défrichement, de terrassement et de construction de la zone descenderie et de la zone puits. Les émissions sont principalement les poussières émises par les explosions, le creusement des galeries et la circulation des engins, ainsi que les particules, composés organiques volatils (COV) et oxydes d'azote liés au fonctionnement des engins et des centrales d'enrobage et de fabrication du béton. L'analyse est qualitative. Le dossier indique qu'« *une quantification des poussières et COV pourra être réalisée pour la phase la plus pénalisante d'aménagements préalables* ». Des mesures de réduction sont envisagées : végétalisation des verses, brumisation des verses non encore couvertes, arrosage des pistes, prise en compte des conditions de vent, adaptation des équipements de chargement et déchargement, limitation des vitesses de circulation, entretien des véhicules, etc.

Une évaluation des émissions radioactives est également proposée. La seule source est constituée par les colis de déchets transportés jusqu'au centre Cigéo puis déchargés dans la zone descenderie. Le terme source[46] des émissions de la descenderie est récapitulé sur le tableau 2.

La dispersion de ces substances radioactives dans l'air est appréciée par modélisation. La plateforme de calcul Ceres du CEA, dont le dossier indique qu'elle est analysée par l'IRSN et l'ASN a été utilisée. Le modèle Aria Impact a été utilisé pour l'évaluation des concentrations au sein du village de Bure. Les résultats[47] sont présentés sur le tableau 2. La comparaison avec le bruit de fond montre que les concentrations ajoutées sont du même ordre de grandeur avec toutefois des concentrations d'isotope 85 du krypton (^{85}Kr) 25 fois plus élevées, sans toutefois de risque sanitaire significatif. L'Ae observe que les données présentées ci-dessus proviennent de deux chapitres distincts de l'étude d'impact, le chapitre 2.4 du volume IV qui concerne les incidences sur la qualité de l'air et le chapitre 3 du volume VI qui présente l'évaluation des risques sanitaires. Les deux présentent des différences qui compliquent leur appropriation par le public[48].

Type de rejet[49]	Installation nucléaire en surface	Cheminée de l'installation souterraine	Concentration maximale à 660 m au SW	Concentration maximale ajoutée à Bure	Bruit de fond dans l'aire d'étude
Tritium (^{3}H)	0,3 GBq/an	300 GBq/an	0,02 Bq/m³	3 mBq/m³	1 mBq/m³
Carbone 14 (^{14}C)	0,2 GBq/an	300 GBq/an	0,01 Bq/m³	2 mBq/m³	25 mBq/m³
Krypton 85 (^{85}Kr)	4 GBq/an	6 000 GBq/an	0,4 Bq/m³	50 mBq/m³	2 mBq/m³
Émetteurs beta	555 Bq/an	300 000 Bq/an	7 nBq/m³	<1 nBq/m³	
Émetteurs alpha	55 Bq/an	30 000 Bq/an	7 nBq/m³	<1 nBq/m³	

Tableau 2 : Rejets radioactifs maximaux annuels du bâtiment nucléaire de la descenderie et de l'installation souterraine et concentrations dans l'air à 660 m et à Bure. Source : dossier.

[46] Le terme source est la liste des substances émises ou susceptibles de l'être et des quantités correspondantes. Il est exprimé en termes de radioactivité en Becquerel (Bq) ou en giga Becquerel (GBq), soit un milliard de Becquerels.

[47] Les concentrations dans l'air sont exprimées par m³, en Bq, milli Bq : millième de Bq, nano Bq : milliardième de Bq.

[48] Par exemple, les concentrations à Bure sont fournies par l'évaluation des risques sanitaires tandis que l'analyse des incidences sur la qualité de l'air présente les valeurs à 660 m et le bruit de fond, de même les modèles de dispersion utilisés diffèrent sans que cela soit explicité.

[49] Les trois premières lignes comportent des radionucléides non piégés dans les déchets MA-VL, les deux dernières sont des particules se trouvant en surface des colis et piégées à 99 % par les filtres à haute efficacité.

Plusieurs mesures d'évitement et de réduction des émissions radioactives sont proposées. L'évitement des rejets repose sur le respect de spécifications de l'Andra pour le conditionnement, le transport et la manutention des déchets et la réduction des rejets est obtenue par leur canalisation en hauteur et l'utilisation de filtres à très haute efficacité. Les effets de ces mesures sont d'ores et déjà pris en compte pour les calculs présentés sur le tableau 2, dont il faut lire les incidences comme étant résiduelles, ce qui n'est pas explicite dans le dossier.

L'Ae recommande d'harmoniser les données du chapitre concernant les incidences sur la qualité de l'air avec celles du chapitre de l'évaluation des risques sanitaires en justifiant le cas échéant le recours à des modèles de dispersion différents.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R21

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour son dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique avec les éléments suivants.

Les incidences sur la qualité de l'air sont modélisées à l'aide d'un outil de calcul choisi en référence, CERES (code d'évaluations rapides environnementales et sanitaires) développé et utilisé par le CEA. L'avantage de cet outil est qu'il couple le modèle de dispersion atmosphérique avec le modèle de transferts au travers des chaines agro-alimentaires vers l'homme et donc permet de calculer les doses directement à partir des rejets.

Par ailleurs, afin de localiser le maximum de concentration des émissions atmosphériques radioactives calculée dans l'air sur le domaine d'étude du modèle de dispersion atmosphérique, un autre logiciel que CERES a été utilisé. Il s'agit de l'outil IMPACT développé par ARIA Technologies. IMPACT modélise uniquement la dispersion atmosphérique, et possède des fonctions supplémentaires telles que localiser un maximum de concentration sur le domaine d'étude et cartographier le panache issu de la modélisation.

Les deux outils (CERES, IMPACT) montrent des résultats similaires (par exemple, de l'ordre de 0,001 Bq/m³ maximum pour le tritium et le carbone 14 rejetés par le centre de stockage Cigéo).

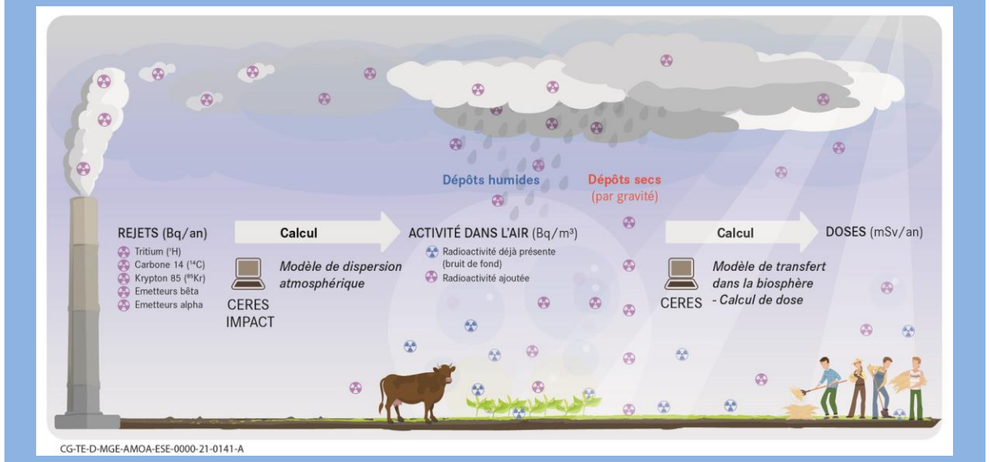


Figure 2-22 Schéma présentant les modèles et codes utilisés pour la dispersion atmosphérique et les calculs de dose

Comme indiqué dans l'étude d'impact du présent dossier de demande de déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, volume IV qualité de l'air, chapitre 2.4.4.3, les incidences des émissions radioactives sur la qualité de l'air sont évaluées par modélisation de la dispersion des gaz et aérosols radioactifs rejetés au niveau des différents émissaires (cheminées) de ventilation des installations nucléaires (bâtiment nucléaire de surface et puits « ventilation air vicié exploitation ») du centre de stockage Cigéo. La modélisation de la dispersion permet de calculer les moyennes annuelles en concentrations dans l'air et en dépôts au sol de chaque élément radioactif rejeté au niveau des cheminées. Les concentrations en gaz et aérosols radioactifs diminuent significativement avec la distance depuis l'émissaire. Une baisse significative est observée sur les premiers kilomètres.

Figure 2-23 Schéma cartographique localisant les cibles étudiées pour les calculs de dispersion atmosphérique ainsi que le maximum du domaine d'étude

Les résultats de la modélisation exprimés en Bq/m³ d'air à Bure et au point maximum du domaine d'étude, calculés avec la plateforme CERES, sont équivalents.

Les concentrations maximales ajoutées dans l'air liées aux rejets de gaz et d'aérosols radioactifs du centre de stockage Cigéo, situées à quelques centaines de mètres de l'émissaire de la zone puits et en dehors des zones habitées sont faibles. Elles diminuent significativement avec la distance. Les concentrations ajoutées sont donc inférieures aux bruits de fond radioactif ambiant qui sont de l'ordre de 0,001 Bq/m³ en tritium, entre 0,025 Bq/m³ et 0,145 Bq/m³ en carbone 14 et environ 0,002 Bq/m³ en krypton 85.

Les calculs de dose au public sont ensuite réalisés aux localisations correspondantes à des habitations. Comme indiqué dans l'étude d'impact du présent dossier de demande de DUP du centre de stockage Cigéo, volume VI Volet sanitaire, chapitre 3.3.2, parmi tous les villages, les concentrations dans l'air calculées sont maximales au niveau du village de Bure (populations les plus exposées) pour l'ensemble des éléments radioactifs rejetés, même si elles restent très faibles. Le principal contributeur à la dose calculée est le carbone 14, dont la concentration dans l'air reste très inférieure au bruit de fond naturel ambiant.

2.3.1.3 Sols

2.3.1.3.1 Occupation des sols

Le projet modifie significativement l'occupation des sols. Les installations de Cigéo proprement dites occuperont 721 ha, dont 388 ha de terres agricoles. La zone puits consommera quant à elle 251 ha de surface boisée. Les autres composantes du projet consomment 62 ha dont 27 ha agricoles et 27 ha déjà artificialisés par la ligne ferroviaire. Le dossier traite l'analyse des incidences environnementales de cette modification de l'occupation des sols dans les chapitres sur l'économie agricole, la biodiversité et les eaux. Il souligne l'équilibre entre la consommation des espaces forestiers et agricoles, équilibre dont on peut penser qu'il a également été un facteur important dans le choix de l'implantation de la descenderie et de la zone puits. Néanmoins, cet équilibre n'est pas en lui-même porteur de minimisation des incidences environnementales.

Des mesures de réduction et de compensation sont proposées. La réduction est obtenue en reconstituant les sols et leur occupation à la fin de la phase de construction et au fur et à mesure du fonctionnement ((cf. figure 4). Sont ainsi « récupérés » 65 ha de terres agricoles, 51 ha de bois et bosquets et 55 ha de milieux naturels et lisières (en fait essentiellement les pelouses d'agrément du centre Cigéo sur 30 ha). Il s'y ajoute 24,5 ha de surface agricole compensée. Le dossier traite l'analyse des mesures compensatoires dans les trois chapitres traitant des compensations écologique, agricole et forestière (cf. *2.3.1.6 Milieux terrestres* page 41 et *2.3.2.1 Services écosystémiques* page 44).

2.3.1.3.2 Déblais et remblais

Le projet se caractérise par des mouvements importants des terres et roches. Les volumes en jeu qui équilibrent les déblais et remblais sont de :

- 5 millions de m³ en phase préalable et 1,6 millions de m³ en phase de construction pour la descenderie ;
- 4 millions de m³ en phase préalable et 2,8 millions de m³ en phase de construction pour la zone puits ;
- 11 millions de m³ d'argilite extraits du sous-sol alimentant les verses végétalisées sur une surface de 147 ha ajoutant, à l'horizon 2070-2080, une hauteur de 20 m au sol actuel, soit la même hauteur que la butte du Chauffour, point culminant actuel du bois Lejuc ;
- 500 000 m³ de déblais, équilibrés avec les remblais, pour les autres parties du projet.

Les mesures de réduction consistent à réemployer 40 % des verses pour le rebouchage des galeries au terme du projet, dans la végétalisation des verses et dans un modelé paysager du terrain.

2.3.1.3.3 Qualité des sols

Les risques de pollution accidentelle des sols en phase travaux font l'objet de mesures de réduction classiques comme le stockage des hydrocarbures sur des aires aménagées équipées de capacités de confinement et une organisation du chantier adaptée.

La pollution par les radionucléides transitant par le milieu aérien est envisagée. Le tritium est susceptible de retomber sous forme d'eau tritiée induisant un dépôt au sol de 300 Bq/m²/an, le carbone et le Krypton étant émis sous forme gazeuse ne se déposent pas sur les sols. Les émetteurs alpha et beta créeront des retombées de 60 µBq/m²/an et 600 µBq/m²/an respectivement. Le dossier n'indique pas quelle sera la quantité cumulée à la fin de la phase de fonctionnement ni le devenir des radionucléides au sein des sols ensuite. L'éventualité d'un accident mettant en jeu un colis de déchet est envisagée mais les mesures prises, notamment en termes de résistance du colis aux chocs, sont jugées suffisantes pour éviter tout rejet.

L'Ae recommande de préciser la quantité cumulée de radionucléides dans les sols en fin d'exploitation, la nocivité associée, et leur devenir pendant la phase de stockage pérenne.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R22

L'Andra prend acte de cette recommandation et confirme que les dépôts accumulés en radionucléides dans le sol pendant la phase de fonctionnement ne seront pas détectables (très inférieurs au niveau de bruit de fond actuel). La dose associée due aux dépôts résiduels accumulés pendant cette phase reçue annuellement par les populations après la fermeture du stockage, est un million de fois inférieure à la dose réglementaire ajoutée égale à 1 mSv/an. Cette dose infinitésimale décroîtra en outre du fait de la décroissance radioactive au cours du temps pendant la phase de stockage pérenne, après fermeture.

Pour rappel, les colis de déchets reçus sur le centre de stockage Cigéo sont des objets solides qui confinent les déchets radioactifs en leur sein. Les rejets évalués en fonctionnement normal sont dus uniquement à un faible relâchement des radionucléides gazeux de certains colis de déchets MA-VL et à la potentielle contamination surfacique sur les colis.

Comme démontré par la suite, les dépôts accumulés en radionucléides dans le sol pendant la phase de fonctionnement ne seront pas détectables (très inférieurs au niveau de bruit de fond actuel) et la dose associée due à ces dépôts résiduels, reçue annuellement par les populations après la fermeture du stockage, sera un million de fois inférieure à la dose réglementaire ajoutée égale à 1 mSv/an.

Comme indiqué dans la pièce 6 Étude d'impact, volume IV, chapitre 3.5.1.3, les émissions de substances radioactives du centre de stockage Cigéo sont très faibles. Elles sont rejetées dans l'air et canalisées via des émissaires (cheminées) et passent par des filtres limitant la quantité de ces substances dans l'environnement à la sortie des émissaires, se dispersent ensuite dans l'air et se déposent potentiellement au sol, en quantités encore plus faibles (certains éléments ne retombant au sol).

Ces dépôts, comme les concentrations dans l'air, sont évalués avec la plateforme de calcul CERES qui permet de modéliser la dispersion atmosphérique et de calculer les doses associées.

Dépôts au sol cumulés en fin d'exploitation

En réponse à la recommandation, il est confirmé que les dépôts au sol sont essentiellement dus aux aérosols (particules en suspension dans l'air). Ces aérosols sont filtrés à 99,9 % grâce aux filtres très haute efficacité (THE) mis en place au niveau des cheminées.

Le dépôt total au sol des substances radioactives, sortant des émissaires et après filtration, correspond à la somme du dépôt sec et du dépôt humide. Le dépôt sec dépend de la forme chimique du radionucléide et de sa masse volumique, il est défini par une vitesse de dépôt sec en m/s. Le dépôt humide correspond au lessivage du panache par la pluie. L'activité massique dans le sol (exprimée en Bq/kg) se calcule à partir du dépôt total au sol, en considérant une épaisseur de sol et une masse volumique. Le tableau 2-5 présente les résultats en activité massique dans le sol pour les trois instants de calcul : 1 an, 50 ans et jusqu'à 150 ans pour couvrir la durée d'exploitation du centre de stockage Cigéo.

Tableau 2-5 Activité massique du sol à Bure (en Bq/kg)

Radionucléide	1 an	50 ans	150 ans
Carbone 14 (sous forme de CO_2)	$2{,}93 \times 10^{-02}$	$3{,}75 \times 10^{-02}$	$3{,}75 \times 10^{-02}$
Tritium ^{3}H (sous forme de HTO)	1,05	1,05	1,05
Krypton ^{85}Kr (gaz rare)	0	0	0
Émetteurs alpha assimilés à du Plutonium 239 (^{239}Pu)	$9{,}52 \times 10^{-07}$	$4{,}72 \times 10^{-05}$	$1{,}39 \times 10^{-04}$
Émetteurs beta/gamma assimilés à du Strontium 90 (^{90}Sr)	$4{,}19 \times 10^{-06}$	$4{,}89 \times 10^{-06}$	$4{,}89 \times 10^{-06}$

Le krypton 85 étant un gaz rare inerte, il ne se dépose pas, ni ne s'accumule dans les sols ou dans la biomasse, l'activité massique dans le sol est donc nulle. Les émetteurs alpha et beta correspondent à une activité surfacique au niveau des colis considérée enveloppe. En réalité, les activités seront bien inférieures. Comme également indiqué dans la pièce 6 Étude d'impact, volume IV, chapitre 3.5.1.3, la modélisation de la dispersion du tritium conduit à une estimation de l'ordre d'un Bq/kg en tritium dans les sols (dépôts maximaux, sous forme de vapeur d'eau tritiée, de quelques centaines de $Bq.m^{-2}$ par an pour une masse volumique du sol de 1 300 $kg.m^{-3}$ et une profondeur de sol de 20 cm), ce qui correspond à une concentration non détectable.

Même après 150 ans d'exploitation, les valeurs ajoutées en radionucléides dans le sol ne seront pas détectables et sont de plusieurs ordres de grandeur inférieures au niveau de bruit de fond actuel des sols français compris entre 0,1 et 1 Bq/kg sec de sols pour la somme des uranium 239 et 240, 10 et 1000 Bq/kg sec en alpha et 0,5 et 10 Bq/kg sec en strontium 90. Les activités liées au bruit de fond en tritium et carbone 14 ne sont pas détectables dans les sols.

En outre, comme précisé dans l'étude d'impact du présent dossier volume IV, chapitres 19.2 et 19.3, un plan de surveillance relatif sera mis en œuvre notamment pour le contrôle des émissions atmosphériques et leurs retombées.

Doses associées aux dépôts accumulés en fin d'exploitation

Les impacts dosimétriques associés aux dépôts accumulés après 150 ans d'exploitation dans le sol, correspondent à la dose par exposition externe au dépôt et à l'ingestion de produits cultivés sur le sol. Ils sont présentés dans le tableau 2-6. Les doses associées sont très faibles de l'ordre du nanosievert/an (soit 1 000 000 fois inférieur au millisievert par an).

Tableau 2-6 Impacts associés aux dépôts de radionucléides dans le sol pour un adulte habitant à Bure après exploitation (>150 ans)

Radionucléide	Dose dépôt (mSv/an)	Dose indirecte par ingestion (mSv/an)		
	Toute classe d'âge	Adulte	Enfant 10 ans	Enfant 1 an
Carbone 14	$1{,}22 \times 10^{-06}$	$1{,}02 \times 10^{-05}$	$1{,}20 \times 10^{-05}$	$1{,}56 \times 10^{-05}$
Tritium ^{3}H (sous forme de HTO)	0	$1{,}88 \times 10^{-07}$	$2{,}12 \times 10^{-07}$	$2{,}77 \times 10^{-07}$
Krypton ^{85}Kr (gaz rare)	0	0	0	0
Émetteurs alpha assimilés à du Plutonium 239 (^{239}Pu)	$1{,}16 \times 10^{-10}$	$2{,}25 \times 10^{-09}$	$1{,}32 \times 10^{-09}$	$1{,}24 \times 10^{-09}$
Émetteurs beta/gamma assimilés à du Strontium 90 (^{90}Sr)	$2{,}43 \times 10^{-10}$	$3{,}56 \times 10^{-09}$	$5{,}51 \times 10^{-09}$	$4{,}34 \times 10^{-09}$
Dose totale	$1{,}22 \times 10^{-06}$	1.04×10^{-05}	1.22×10^{-05}	1.59×10^{-05}

Les doses au-delà de 150 ans, associées à l'exposition externe (dose dépôt) ou l'ingestion indirecte (due aux radionucléides restant dans le sol) sont de l'ordre du nanosievert par an (dose ajoutée un million de fois inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an). Après la fermeture de l'installation et de l'arrêt des rejets, la concentration dans les sols, et par conséquent la dose associée, déjà extrêmement faibles, diminueront avec la décroissance radioactive, avec notamment la période du carbone 14, principal contributeur, égale à 5 730 ans.

2.3.1.4 Sous-sol

2.3.1.4.1 Stabilité du sous-sol

Du fait de la stabilité du sous-sol depuis plusieurs millions d'années, le dossier conclut que la couche géologique dans laquelle Cigéo sera creusé est « asismique ». Outre l'absence d'actualisation de la carte sismique de France observée par l'Ae dans le présent avis au chapitre « 2.1.1.3 Sous-sol » de l'état initial, l'Ae observe que les ouvrages souterrains se situent à 2 km du fossé de Gondrecourt (cf. figure 5 page 15), distance qui n'est pas justifiée en termes de risques pour le stockage. L'Ae souligne par ailleurs la nécessité d'étudier les incidences réciproques de Cigéo et du stockage de gaz souterrain de Trois-Fontaines-l'Abbaye situé à 30 km du projet (cf. chapitre 3.2).

Le rapport de l'Institut des sciences de l'univers du CNRS[50] suite au séisme du 11 novembre 2019, sur la commune du Teil, en Ardèche, indique que ce séisme s'est produit par glissement d'une faille qui était jusqu'alors considérée comme « éteinte ». D'après des chercheurs ayant participé à l'expertise du CNRS, ce séisme remet en cause la carte sismique de France[51]. Il importe donc de vérifier ce caractère asismique à l'aune de ces dernières études.

L'Ae recommande de :

- ***mieux caractériser le fonctionnement et la dynamique du fossé de Gondrecourt afin d'étayer la justification du lieu d'implantation des ouvrages souterrains,***

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R23

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments de réponse suivants.

Le chapitre 4.2. du volume III de l'étude d'impact, pièce 6 du présent dossier de demande d'utilité public du projet global Cigéo, détaille le contexte tectonique de la partie orientale du Bassin parisien dans lequel s'intègre ce projet. Le fossé de Gondrecourt fait partie d'un ensemble de structures similaires contemporaines (fossés de Joinville, de Colombey-les-Belles, de Rémoville) affectant, sans les déformer, les terrains sédimentaires de la Lorraine centrale situés à l'intérieur d'une zone délimitée, au nord, par la faille de Vittel et, au nord, par l'axe du synclinal de Savonnières-en-Perthois. Leur formation est attribuée à la phase d'extension oligocène synchrone de celle de la formation du fossé rhénan, soit entre 25 et 34 Millions d'années (Bergerat *et al.,* 2007 (33), Pagel *et al.,* 2018 (34)).

Plus spécifiquement, le fossé de Gondrecourt, d'orientation NE-SO (N30°E) et d'une longueur totale d'environ 30 km entre Vacon (au nord-est) et Pautaines-Augeville en Haute-Marne (au sud-ouest) a fait l'objet d'une caractérisation statique et dynamique fine grâce à l'ensemble des campagnes de reconnaissance géologique (reconnaissance de terrain, forages Andra, Andra 2005) et géophysique (retraitement de profils pétroliers et acquisition de sismique réflexion 2D et 3D, qui ont été menées sur le secteur par l'Andra.

Il s'agit d'un fossé de couverture, c'est à dire qu'il ne s'enracine pas en profondeur dans le socle mais il s'amortit dans les formations du Trias et du Permien sous-jacentes (Cf. Figure 2-24). Situé en bordure orientale de la zone de transposition (ZT) d'environ 250 km² qui a été définie en 2005 (Andra 2005) comme la zone de faisabilité de principe du stockage géologique, sa largeur est d'au maximum de 2 km et sa distance à la zone de transposition est de l'ordre de 1 km pour la faille bordière secondaire la plus à l'ouest et de l'ordre de 3 km pour la faille principale qui borde le fossé à l'est (cf. Figure 2-25). Les rejets le long de ce fossé ont pu être estimés grâce au retraitement et à l'interprétation des profils sismiques 2D qui le recoupent. La faille principale qui borde le fossé à l'est montre les rejets les plus importants. Ils diffèrent cependant du nord-est au sud-ouest. En partie nord-est, ils sont de l'ordre de 40 à 50 m au niveau des encaissants (calcaires du Dogger et de l'Oxfordien) de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, et sont de l'ordre de 70 à 80 en partie sud-ouest au niveau de ces mêmes encaissants.

Aucun indice de déformation néotectonique n'a été reconnu sur le fossé de Gondrecourt, ni dans son voisinage, ce dernier étant inactif depuis à minima 2 millions d'années, c'est-à-dire depuis le quaternaire (base de données NEOPAL-http://www.neopal.net/). En regard de la signature sismique, aucune déformation n'aurait affecté ce dernier depuis la dernière grande phase tectonique distensive Oligocène, soit depuis les derniers 25 millions d'années (Pisapia *et al.,* 2017 (35)), ou du moins depuis les prémices de la phase alpine miocène il y a 18-20 millions d'années.

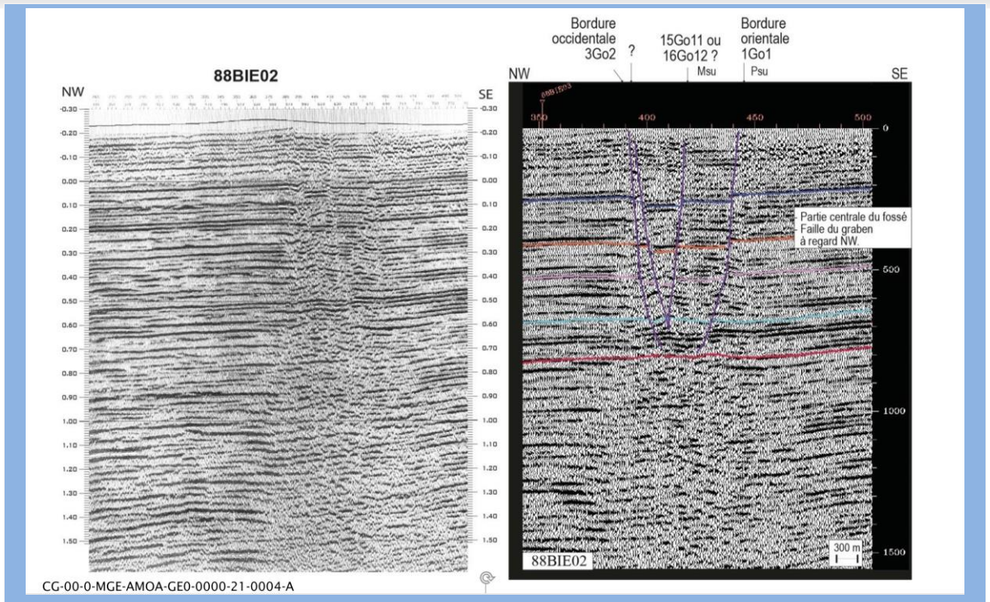


Figure 2-24 *Interprétation du profil pétrolier 88BIE02 montrant l'amortissement du fossé de Gondrecourt en profondeur au toit du Permien (voir Figure 2-25 pour la localisation)*

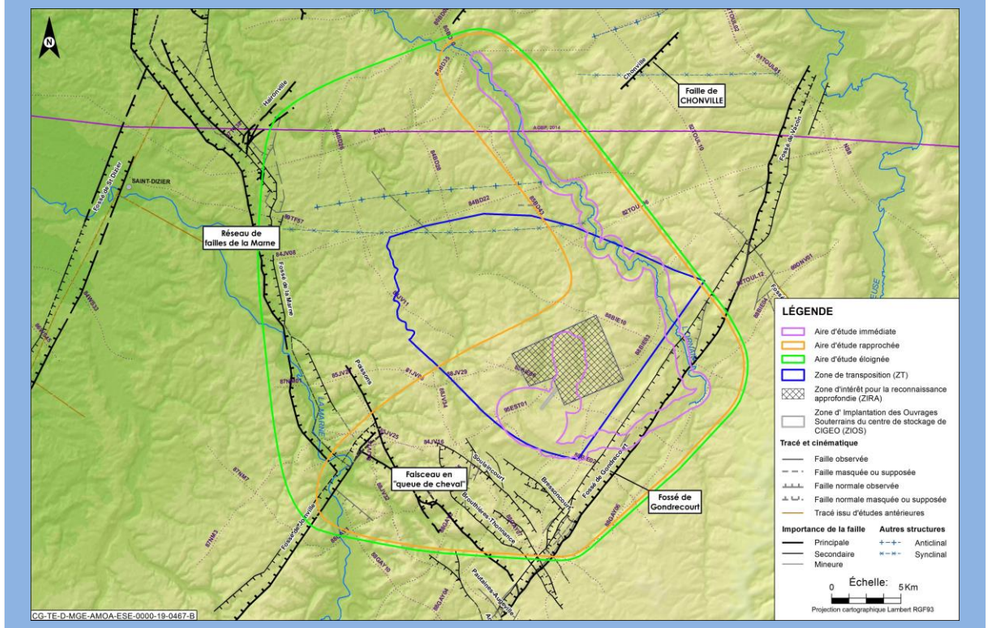


Figure 2-25 *Schéma structural illustrant le fossé de Gondrecourt en bordure sud-orientale de la ZT et localisation du profil sismique 88BIE02 de la Figure 2-24*

- ***démontrer que le caractère asismique de la couche géologique de la zone d'implantation des ouvrages reste avéré à l'aune des nouveaux éclairages sur la sismicité en France à la suite du séisme du Teil en 2019.***

[50] Insu 2019. Rapport d'évaluation du groupe de travail (GT) CNRS-INSU sur le séisme du Teil du 11 novembre 2019 et ses causes possibles

[51] Le site de l'UMR Géosciences Montpellier indique : « *Cet évènement pose de nouvelles questions en termes d'évaluation du risque sismique en France métropolitaine où les taux de déformation sont très faibles, ainsi que dans d'autres régions intracontinentales considérées comme stables telle que l'Europe occidentale.* »

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R23

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments de réponse suivants.

Le chapitre 4.2 du volume III de l'étude d'impact rappelle aussi que la région d'implantation du projet global Cigéo se situe en partie orientale du Bassin parisien ; celui-ci repose sur le craton ouest européen, l'une des zones géologiques les plus stables de la plateforme ouest-européenne qui se comporte comme un bloc rigide et stable (Ziegler and Dezes, 2006 (36)). Le Bassin parisien oriental est à l'écart de toutes influences majeures de la compression alpine : il se caractérise par un taux de déformation nul à extrêmement faible (Tesauro *et al.*, 2006, (37)) et par l'absence de toute activité sismique historique et instrumentale (cf. Le réseau d'acquisition de mesure sismique mis en place depuis presque 60 ans sur la région par le CEA/LDG), ce qui lui confère un caractère asismique comme visible sur la Figure 2-26 (cf. la base Sisfrance (https://sisfrance.irsn.fr/), et la base SIHEX (http://www.franceseisme.fr/sismicite.html – Cara*et al.*, 2015, (38))) et la Figure 2-27 (cf. Réseau d'Écoute Sismique (RES)). Ces figures sont présentées au chapitre 4.6.2 du volume III de l'étude d'impact.

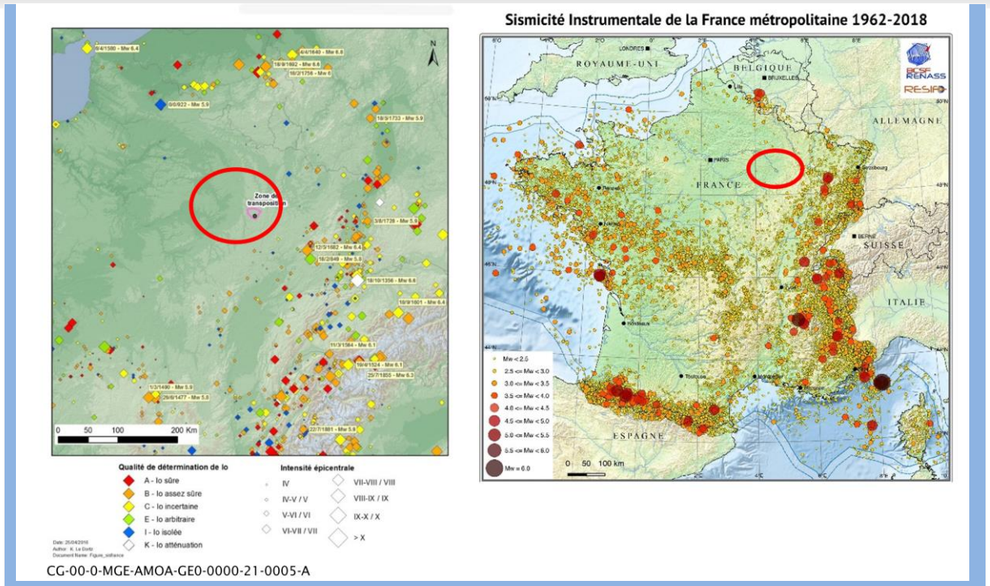


Figure 2-26 *Sismicité historique (base SisFrance à gauche) et instrumentale (base SiHex – Cara et al., 2015 à droite) et localisation de la région de Meuse/Haute-Marne*

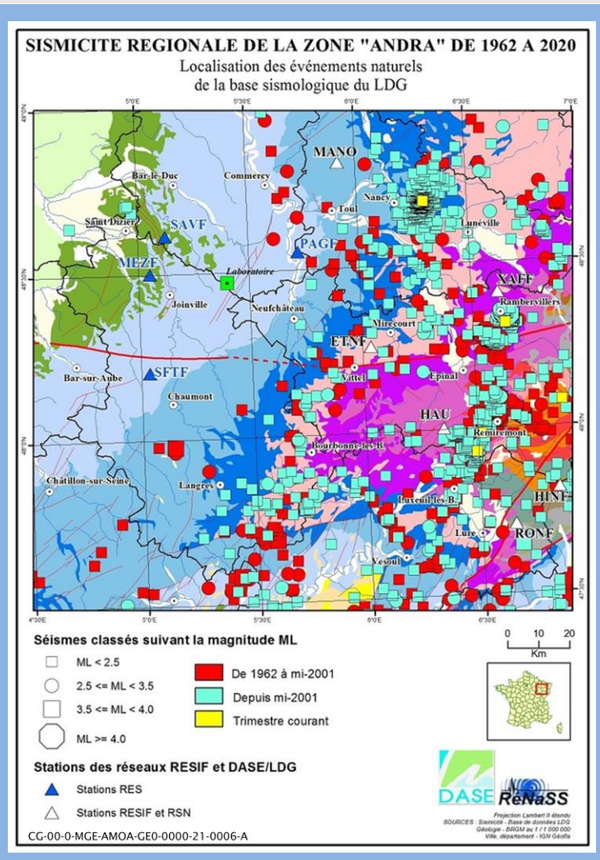


Figure 2-27 *Carte de la sismicité naturelle de la « zone Andra » sur la période 1962- 2020 sur fond géologique (trimestre courant : octobre-novembre-décembre 2020)*

Par ailleurs et en termes de tectonique, l'Andra, à partir de l'analyse de données de la littérature, de travaux de reconnaissance sur le terrain (forages, géophysiques), de l'interprétation des profils pétroliers de sismique réflexion ainsi que celle du bloc de la sismique 3D haute résolution, ou encore l'analyse de la fracturation étudiée sur l'ensemble des forages, a reconnu et caractérisé l'ensemble des structures tectoniques sur le secteur de Meuse/Haute-Marne dans un rayon de 30 à 40 km autour du Laboratoire de recherche souterrain et fourni *In fine* un schéma structural cohérent et homogène aux échelles régionale (à l'échelle de la région Champagne-Lorraine) et locale (à l'échelle du secteur de Meuse/Haute-Marne).

De ce schéma structural se distingue alors nettement une large zone, la zone de transposition (ZT), s'étendant du Laboratoire de recherche souterrain jusque plus au nord, dépourvue de toute structure tectonique. Enfin, et contrairement à ce que l'on observe fréquemment en vallée du Rhône (Larroque *et al.,* 2020 (39), Ritz *et al.,* 2020 (40)), aucun indice de déformation néotectonique n'a été reconnu sur l'ensemble des failles et systèmes de failles avoisinant et dans leur voisinage (cf. La base de données NEOPAL-http://www.neopal.net/, base BDFA, (https://bdfa.irsn.fr)), l'ensemble des structures étant inactif depuis à minima 2 millions d'années (Baize *et al.,* 2013 (41)), c'est-à-dire depuis le Quaternaire, et plus probablement depuis la dernière phase distensive oligocène, soit depuis les derniers 25 millions d'années (Pagel *et al.,* 2018 (34), Pisapia *et al.,* 2017 (35)).

Néanmoins, afin d'avoir de plus amples connaissances et de mesurer plus largement l'activité sismique potentielle sur la région, l'Andra a mis en œuvre depuis une vingtaine d'années des moyens de surveillance sismique dans et autour du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. L'ensemble des enregistrements de sismicité contribue à l'enrichissement de la base de sismicité nationale du CEA/LDG :

- le Réseau d'Écoute Sismique (RES) couvre un rayon de 30-50 km autour du Laboratoire souterrain (cf. Figure 2-27). Son suivi et sa maintenance sont assurés par le LDG-CEA. Il permet une écoute sismique fine de la région et la discrimination des sismicités naturelle et anthropique et/ou induite ;
- le réseau accélérométrique ACC est disposé sur toute la verticale du Laboratoire souterrain (puits et fond). Il vient renforcer le réseau RES et permet d'évaluer les fonctions de transfert dans le sous-sol.

Combinés aux données des réseaux nationaux mis en place depuis 1962 (RSN, RéNaSS), soit presque 60 ans d'observation, le Réseau d'Écoute Sismique (RES) et le réseau accélérométrique :

- confirment l'absence de sismicité naturelle depuis 1962 à l'ouest d'une ligne Chaumont-Neufchâteau-Commercy (cf. Figure 2-27), exception faite d'un séisme très superficiel de très faible magnitude (M = 0.9) proche de Vitry-le-François en 2004 (cf. Figure 2-26, figure 2-27 et figure 2-28) ;
- permettent d'identifier et localiser la sismicité induite, notamment les tirs de carrière (cf. Figure 2-28).

Ainsi, outre l'identification et la caractérisation de l'ensemble des tirs de carrières sur la région (cf. Étoiles sur la figure 2-28) par ces réseaux, la sismicité induite a fait l'objet d'une attention particulière quant à la discrimination des séismes naturels et anthropiques (cf. Carrés sur la figure 2-28 carte de la sismicité totale (naturelle, induite et tirs de carrière) de 1962 à 2020). Ainsi, deux « essaims » de sismicité induite ont été reconnus comme distingués sur la figure 2-28 carte de la sismicité totale (naturelle, induite et tirs de carrière) de 1962 à 2020, les deux sites de stockage de gaz souterrain de Cerville situé à 70 km à l'est, et le site de Trois Fontaines-l 'Abbaye situé à plus de 40 km au nord-nord-ouest. La sismicité induite, provoquée par le pompage de gaz stocké dans ces stockages souterrains est caractérisée par des évènements de très faible magnitude, de l'ordre de M = 0.5 à 2.8 à Cerville et de l'ordre de M = 0.6 à 1.2 sur le site de Trois Fontaines. Cependant, compte tenu de la grande distance au site et de la très faible magnitude de ces évènements leur effet sera très fortement atténué et n'auront aucun impact sur les infrastructures et installations du centre de stockage Cigéo tant en surface qu'en profondeur, dimensionnées de manière conservative pour des séismes de plus grande ampleur.

Le contexte sismotectonique qui domine actuellement sur la région doit se poursuivre sur le prochain million d'années, en regard de la courte durée que représente le million d'années par rapport aux constantes de temps de l'évolution géodynamique interne et tectonique comptées en dizaines de million d'années. Compte tenu du continuum de la convergence Europe-Afrique (sans aucun blocage à venir) et de l'ouverture de l'Atlantique, ce contexte géodynamique et tectonique régional n'est pas comparable à celui de la vallée du Rhône qui est le siège de déformations actives et d'une sismicité modérée. Les taux et vitesses de déformation restant nuls à extrêmement faibles et le champ de contraintes ne variant pas, il est ainsi exclu toute variation de la tectonique à l'origine du déclenchement de séismes sur les failles avoisinantes, à l'image de celui du Teil sur la faille de la Rouvière.

Pour rappel, le contexte sismotectonique de la région d'implantation du projet global Cigéo diffère notablement et significativement de celui de la vallée du Rhône où s'est produit le séisme du Teil. En effet, la vallée du Rhône, localisée au front même des chevauchements alpins plus à l'est, est caractérisée par une sismicité modérée et soutenue dans le temps (Larroque *et al.,* 2020 (39), Ritz *et al.,* 2020 (40)) et un taux de déformation notable (10^{-1} nstrain/yr) en relation directe avec la poussée alpine voisine de deux à trois ordres de grandeur supérieur à celui qui règne sur le Bassin parisien oriental (10-3 – 10^{-4} nstrain/yr, Tesauro *et al.,* 2006 (37)). Le séisme du Teil s'est produit sur la faille de la Rouvière (Ritz *et al.,* 2020 (40)) qui appartient au système de failles bien connu des Cévennes.

Ce système de failles est suspecté d'une activité quaternaire non négligeable avec des traces d'activités néotectoniques reconnues et est considéré de fait comme potentiellement actif à l'exemple de la faille active de Marsanne localisée 2 km plus à l'est de celle de la Rouvière (base de données NEOPAL-(http://www.neopal.net), base BDFA, (https://bdfa.irsn.fr)).

L'origine de ce séisme du Teil, selon les publications disponibles sur le sujet (cf. Larroque *et al.,* 2020 (39), Ritz *et al.,* 2020 (40)), tendent à montrer en première approximation que le chargement d'origine tectonique en relation directe avec la poussée alpine voisine de la faille semble être prédominant et constitue le facteur principal contrôlant le séisme. Néanmoins, il n'est pas exclu que l'exploitation de la carrière du Teil à l'aplomb du segment NO de la faille de la Rouvière au cours des dernières décennies ait pu aider au déclenchement du séisme, ou ait pu faciliter le développement d'une partie de la rupture sismique, celle qui est la plus proche de la carrière. Par contre, l'ampleur de la chute de contrainte cisaillante calculée pour le séisme est bien supérieure au changement de contrainte cisaillante induit par la présence de la carrière, ce qui implique que le chargement tectonique de la faille est prédominant et constitue le facteur principal contrôlant le séisme, la carrière n'ayant pu avoir pour simple rôle que de raccourcir le temps de retour d'un séisme de magnitude Mw = 4.9 sur cette faille. De telles conditions géodynamiques et anthropiques ne se retrouvent pas en partie orientale du Bassin parisien en termes de taux de déformation et d'activité sismique, et au pourtour du site du centre de stockage Cigéo en termes anthropique par l'absence de toute excavation à l'aplomb, voire même au voisinage immédiat des failles qui encadrent la ZT ; ces deux conditions excluent de fait le déclenchement d'un tel séisme sur les failles du fossé de Gondrecourt par exemple.

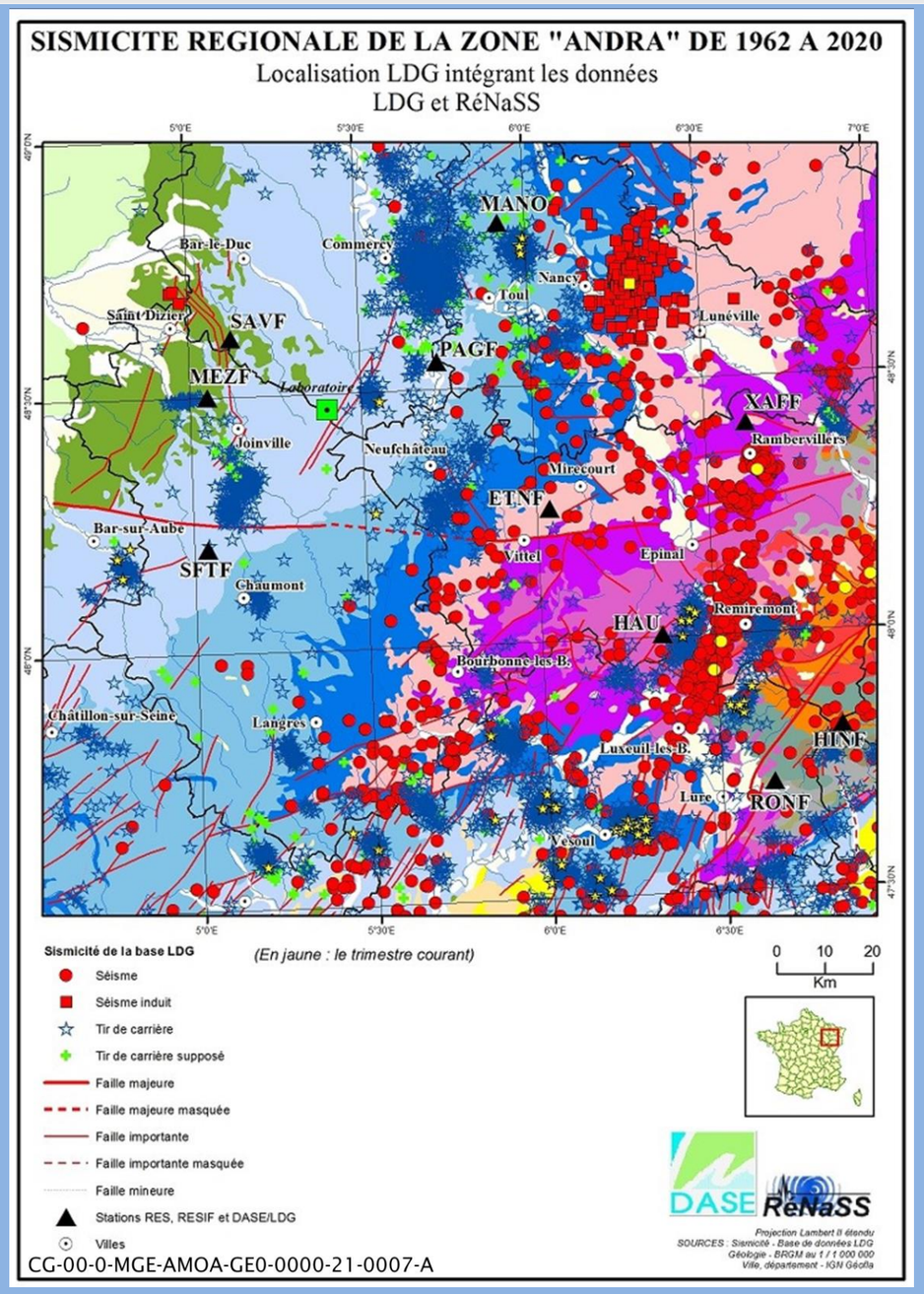


Figure 2-28 *Carte de la sismicité totale (naturelle, induite et tirs de carrière) de 1962 à 2020*

2.3.1.4.2 Transfert des radionucléides dans le sous-sol

Le dossier souligne le très faible risque de transfert des radionucléides au sein de la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien. Il se fonde pour cela sur plusieurs décennies d'études dans le laboratoire souterrain de Meuse-Haute-Marne de l'Andra ainsi que d'autres études internationales. Le dossier ne fournit cependant pas les détails qui permettent de s'assurer de la validité de cette assertion, renvoyant à la partie « Après fermeture » du dossier d'options de sûreté établi en 2016. L'Ae considère que l'étude d'impact doit reprendre les éléments principaux de ce dossier afin d'être autoportante et d'informer complètement le public. Pour la suite de la compréhension de l'avis, l'Ae résume ci-dessous les principales caractéristiques de la couche géologique qui expliquent la très faible progression de la contamination des argilites pendant la phase de stockage.

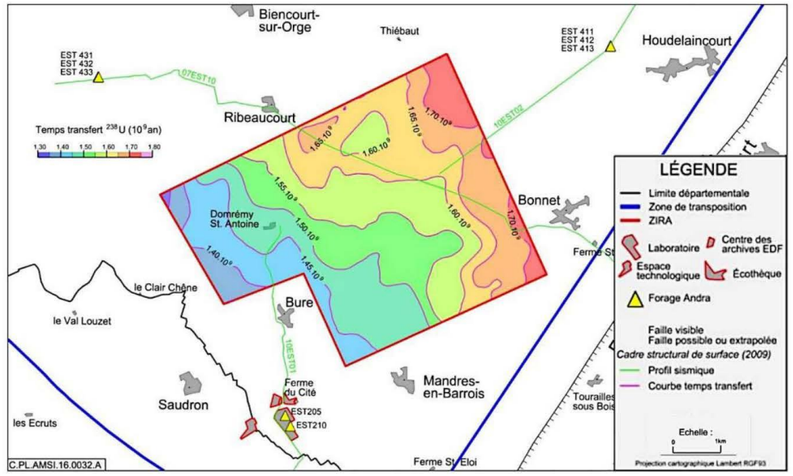


Figure 11 : Carte des temps de transfert de ^{238}U depuis le stockage Cigéo vers le toit de la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien. Source : Andra 2016, Dossier d'options de sûreté après fermeture.

Les seuls radionucléides susceptibles de migrer dans l'eau interstitielle de la couche d'argilite sont les halogénures[52] : Cl^-, Br^- et I^-. Ainsi, la plupart des radionucléides qui rejoindront la couche géologique vont s'adsorber à la surface des particules de roche sans rejoindre l'eau circulante. La perméabilité de l'argilite est très faible, l'écoulement de l'eau est de quelques dizaines de centimètres pour 100 000 ans. La figure 11 montre les temps de transferts calculés pour l'uranium. La diffusion des radionucléides varie selon leur caractère cationique (ions positifs), anionique (ions négatifs) ou neutre. La capacité de diffusion d'un anion comme le chlore 36, non adsorbé et très soluble dans l'eau vers le toit de la couche d'argilite est de 700 000 ans pour un parcours d'environ 60 m.

L'Ae recommande de compléter l'étude d'impact par les principaux éléments du dossier d'options de sûreté concernant la fermeture du site afin d'informer complètement le public sur le risque de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien.

[52] Les halogènes sont constitués par le Fluor (F), le Chlore (Cl), le Brome (Br) et l'Iode (I). Les ions halogénures sont des atomes d'halogènes ayant gagné un électron (F^-, Cl^-, Br^- et I^-).

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R24

L'Andra prend acte de cette recommandation et a ajouté dans le présent dossier d'enquête publique préalable à la DUP une synthèse des options de sûreté (en annexe 1 du présent mémoire) en complément des éléments relatifs à la sûreté mentionnés dans l'étude d'impact.

L'étude d'impact du présent dossier d'enquête publique préalable à la DUP fait référence dans les chapitres relatifs à la sûreté et aux impacts potentiels, notamment après fermeture, au dossier d'options de sûreté (les options de sûreté dans leur intégralité sont disponibles sur le site de l'Andra à l'adresse suivante https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference). L'Andra a pris l'option dans l'étude d'impact de présenter les résultats des éventuelles incidences de façon synthétique et de référencer le dossier d'options de sûreté pour plus de détails.

Afin de faciliter la lecture au public des principaux éléments des options de sûreté, et en réponse à la demande de l'autorité environnementale, l'Andra a décidé de présenter une synthèse des options de sûreté en complément de ceux relatifs à la sûreté mentionnée dans l'étude d'impact (en particulier des chapitres dédiés des volumes II, IV et VI.) Cette synthèse comprend notamment une présentation de la méthodologie retenue pour les analyses des risques en exploitation ainsi que les analyses de risques et incertitudes après fermeture. Cette synthèse présente les principaux éléments du dossier d'options de sûreté sur le risque de transfert des radionucléides dans la couche du Callovo-Oxfordien. Elle est annexée au présent mémoire.

Par ailleurs, dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de création, conformément à l'article R. 593-16 du code de l'environnement, en plus de l'étude d'impact ; une étude de maitrise des risques sera établie. Conformément à l'article R. 593-19, l'étude de maîtrise des risques, pièce constitutive du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base du centre de stockage comprendra :

- un inventaire des risques que présente l'installation, d'origine tant interne qu'externe ;
- une analyse des retours d'expériences d'installations analogues ;
- une présentation des méthodes retenues pour l'analyse des risques ;
- une analyse des conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement ;
- une présentation des dispositions envisagées pour la maîtrise des risques, comprenant la prévention des accidents et la limitation de leurs effets ;
- une présentation synthétique des systèmes de surveillance ainsi que des dispositifs et des moyens de secours ;
- un résumé non technique de l'étude destiné à faciliter la prise de connaissance par le public des informations qu'elle contient.

La première mesure d'évitement est celle qui a permis d'optimiser le choix du site au sein de la couche d'argilite. Une première zone dite « *zone de transposition* » a été délimitée sur des critères géologiques, à l'écart des failles : fossé de Gondrecourt et faille de la Marne (cf. figure 5 page 15). La deuxième mesure d'évitement est liée au caractère progressif de la construction qui permettra aux générations futures de modifier le programme de livraison des colis et d'accélérer, de retarder ou de modifier la construction des extensions. Curieusement, la réversibilité du stockage qui devrait permettre de récupérer les colis si cela était décidé pendant le siècle à venir n'est pas évoquée. Enfin, il est indiqué que les zones présentant un caractère exceptionnel en termes de ressources souterraines ont été évitées (carrières, ressources de minerai et d'hydrocarbures, géothermie). L'Ae observe que des ressources de peu d'intérêt avec les méthodes d'extraction aujourd'hui disponibles peuvent avoir un intérêt futur, voir à cet égard le chapitre 3.2.

L'Ae recommande d'intégrer formellement la réversibilité du stockage à la mesure d'évitement qui consiste à déployer progressivement l'installation souterraine.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R25

L'Andra prend acte de la recommandation et rappelle ci-dessous le lien entre réversibilité et progressivité du déploiement de l'installation.

Comme défini à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, en cohérence avec le considérant 23 de la directive européenne de 2011, « *la réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion* ».

Selon le même article L. 542-10-1 du code de l'environnement, la réversibilité est mise en œuvre par :

- la progressivité de la construction :
  - ✓ elle correspond à un enchaînement prudent d'opérations de construction et de mises en service successives de parties du centre de stockage sur toute la durée de son fonctionnement. La programmation de ces opérations pourra être revue pour accélérer, retarder ou modifier la construction et la mise en service de ces extensions. Dans le temps long, elle offre notamment la possibilité aux générations futures d'améliorer progressivement les ouvrages des extensions pour bénéficier des meilleures technologies et de les adapter à d'éventuelles évolutions d'inventaire.
- la flexibilité de l'exploitation :
  - ✓ elle correspond à la capacité du centre de stockage Cigéo, une fois construit, à absorber des variations de son programme industriel sans modification des infrastructures ou des équipements existants et sans construction d'ouvrages nouveaux. Elle permet notamment de faire évoluer, dans certaines plages de variation, l'ordre et le rythme d'arrivée des colis de déchets radioactifs, de faire évoluer les modes de conditionnement prévus et de reprogrammer les dates de fermeture.
- l'adaptabilité de la conception :
  - ✓ elle correspond à la capacité à modifier les installations pour les adapter, en particulier à des modifications de son inventaire, c'est-à-dire au nombre et aux types de déchets radioactifs à stocker. Cigéo est conçu pour stocker l'inventaire de référence et l'Andra étudie son adaptabilité en analysant les impacts sur la conception du stockage éventuel de l'inventaire de réserve.
- la récupérabilité des colis :
  - ✓ elle correspond à la capacité à retirer des colis de déchets d'une installation de stockage en couche géologique profonde. L'Andra a intégré la capacité de retirer les colis stockés aux exigences de conception de Cigéo. Pour la bonne information du public, des éléments de synthèse sur la récupérabilité sont disponibles sur le site de l'Andra (42).

Les différents enjeux liés à la réversibilité du centre de stockage Cigéo sont présentés au chapitre 5.4 du volume II de l'étude d'impact du projet global du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo.

La construction progressive correspond à la programmation de référence du déploiement du centre de stockage Cigéo sur la durée séculaire de ses phases de construction initiale, de fonctionnement, ainsi que de démantèlement et de fermeture.

Potentiellement, les autres volets de la réversibilité pourraient aussi être considérés comme des mesures d'évitement potentielles d'incidences sur le sous-sol, s'il était un jour décidé de les mettre en œuvre :

- le retrait éventuel de colis pourrait permettre de réorienter tout ou partie des colis de déchets vers un mode de gestion alternatif si leur stockage dans Cigéo n'était plus considéré comme la meilleure solution environnementale à long terme ;
- l'adaptabilité permettrait, si un élargissement de l'inventaire de référence était décidé, d'accroître la capacité du centre de stockage Cigéo et pourrait, dans une certaine mesure, éviter de créer un second centre de stockage profond ;
- la flexibilité permet également, dans une certaine mesure, d'accepter des modifications du programme d'expédition et des modes de conditionnement des déchets et donc à ne pas avoir à créer une autre installation d'entreposage, voire de stockage, si ces évolutions s'avéraient impératives.

Il faut toutefois souligner que, si ces trois volets particuliers de la réversibilité constituent, conformément aux exigences du code de l'environnement, des possibilités de choix offertes aux générations successives. Elles ne seront mises en œuvre que si elles répondent à un besoin concret soit de l'exploitant, soit de la société. Ce sont des opportunités offertes de prendre, ou non, dans le futur, des décisions dont certaines seraient susceptibles d'éviter des incidences sur le sous-sol. Ce sont donc des mesures potentielles, qui ne peuvent pas être considérés au même titre que les autres mesures d'évitement que l'Andra introduit concrètement dans son projet.

Par ailleurs, les décisions de mise en œuvre de la réversibilité, en particulier celle d'élargir l'inventaire à stocker ou de rediriger tout ou partie des colis stockés vers d'autres filières ne sont pas du ressort de l'Andra. Elles seraient prises au niveau ministériel, après avis de l'ASN, et seraient encadrés par les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR).

2.3.1.4.3 Disponibilité des matériaux

Le dossier interroge la compatibilité du projet avec le schéma régional des carrières. Il souligne le fort besoin de matériaux du projet avec 5,7 millions de tonnes de granulats, 1,4 millions de tonnes de ciment et 4,9 millions de tonnes de sables. La comparaison avec le schéma régional des carrières n'est cependant pas quantitative. Le dossier n'explicite pas la provenance des matériaux utilisés dans le cas notamment où l'approvisionnement local ne serait pas possible.

L'Ae recommande d'analyser de manière plus approfondie la compatibilité du projet avec le schéma régional des carrières et de fournir une estimation des origines des matériaux utilisés.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R26

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments de réponse suivants afin d'examiner plus en détail la compatibilité du projet avec les schémas des carrières existants concernant les ressources en matériaux.

Cette analyse confirme que les besoins en matériaux de carrière du projet global Cigéo sont compatibles avec la production des carrières et cimenteries présente dans la région Grand Est. De plus, comme préconisé dans les schémas départementaux en vigueur, le projet met en place des mesures d'utilisation économe et rationnelle de la ressource comme l'utilisation de matériaux de recyclage ou la valorisation des verses. (cf. Pièce 6, volume IV, chapitre 4.5.3).

Le schéma régional des carrières pour la région Grand Est n'ayant pas encore été adopté, la compatibilité du projet avec les schémas départementaux des carrières a été étudiée, comme prévu par la loi n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (43) (voir pièce 6, volume IV, chapitre 4.5.3). L'Andra détaille ici l'analyse des circuits d'approvisionnement identifiés pour consolider la compatibilité du projet global Cigéo avec les schémas des carrières actuellement en vigueur. Ces éléments complémentaires sont reportés dans l'étude d'impact au chapitre 4.5.3 du volume IV relatif à la compatibilité du projet avec ces schémas. Sont analysées dans un premier temps les filières d'approvisionnement en sables et graviers puis dans un second temps les filières d'approvisionnement en ciment.

Les sables et les graviers

Les granulats (sables et graviers) sont utilisés dans la fabrication du béton servant à la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Ils sont également employés dans la réalisation de remblais, fondations, couches routières, etc. Ce sont des matières premières extraites dans des carrières.

L'identification des carrières de granulats a été réalisée grâce à un fichier transmis par la DREAL Grand Est (source BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières). Ces informations ont été vérifiées et complétées à l'aide de la base de données sur les installations classées du ministère de la Transition Écologique.

Les carrières produisant généralement à la fois du sable et du gravier, les productions de sables et de graviers ne sont pas différenciées.

La région Grand Est accueille plus de 300 carrières en fonctionnement représentant une production annuelle d'environ 84 millions de tonnes, alors que les besoins de la région s'élèvent à environ 36 millions de tonnes par an. La production régionale est donc largement excédentaire. La région importe ainsi peu de granulats de l'extérieur, mais exporte vers des régions déficitaires et des pays frontaliers (Allemagne, Suisse notamment). L'analyse des flux régionaux indique que plus de 95 % des granulats (sables et graviers) consommés dans le Grand Est proviennent du Grand Est.

Les carrières sont de tailles variables. Leur capacité moyenne est d'environ 270 000 tonnes par an (tous produits confondus). Mais il y a de forts écarts par rapport à cette moyenne : certaines carrières produisent quelques dizaines de milliers de tonnes par an, tandis que d'autres produisent plus d'un million de tonnes.

La géographie de l'offre est aussi importante, en raison de la part élevée du coût du transport dans le coût global du produit, qui conduit à privilégier des distances courtes d'acheminement. Les départements alsaciens (Haut-Rhin et Bas-Rhin) sont les plus gros producteurs de la région Grand Est, mais sont aussi les plus éloignés du centre de stockage Cigéo. La Meuse et la Haute-Marne produisent respectivement environ 4 millions et 8 millions de tonnes de granulats par an (sables et graviers confondus).

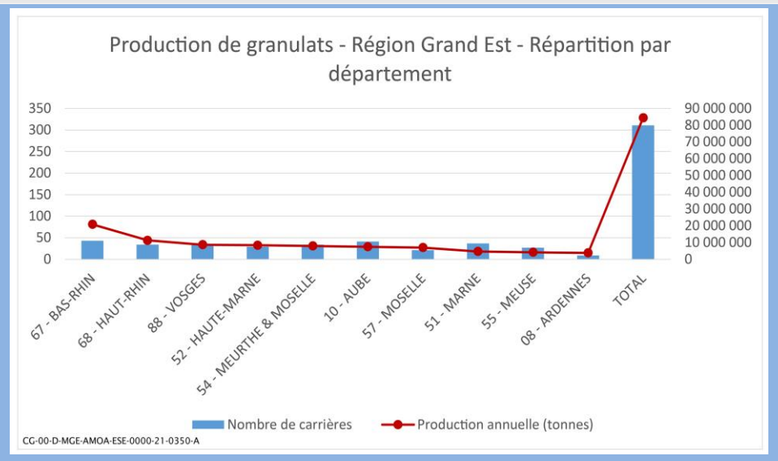


Figure 2-29 *Région Grand Est - Production de granulats par département*

À son pic, durant la phase de construction initiale, la consommation annuelle de sables et de graviers du centre de stockage Cigéo atteint un peu moins de 1,3 millions de tonnes, soit environ 1,5 % de la production annuelle de la région Grand Est. Les carrières de la région Grand Est sont donc susceptibles de couvrir l'ensemble des besoins du centre de stockage Cigéo.

Parmi les carrières de la région Grand Est, une cinquantaine sont déjà identifiées comme étant susceptibles d'approvisionner le centre de stockage Cigéo, en raison de leurs caractéristiques, notamment leurs grandes capacités de production (supérieures à 250 000 tonnes par an). La production annuelle cumulée de ces carrières s'élève à 32,6 millions de tonnes, ce qui représente environ 25 fois le besoin du centre de stockage Cigéo à son année de pic.

Les graphiques ci-dessous présentent la distribution de ces carrières selon leurs distances du centre de stockage Cigéo, leurs productions annuelles et leur embranchement ou pas au réseau ferré. Les deux tiers des carrières sont à moins de 150 km. Seules cinq carrières disposent d'un terminal embranché.

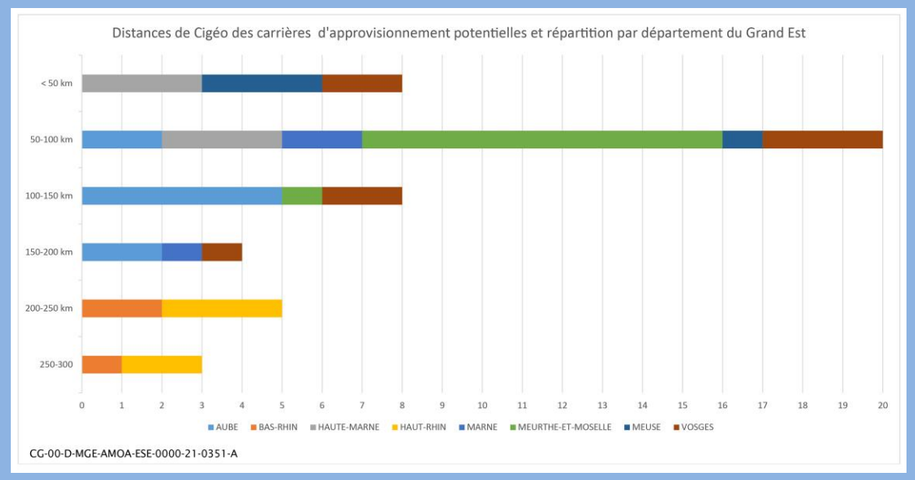


Figure 2-30 *Distances du centre de stockage Cigéo des carrières d'approvisionnement potentielles et répartition par département du Grand Est*

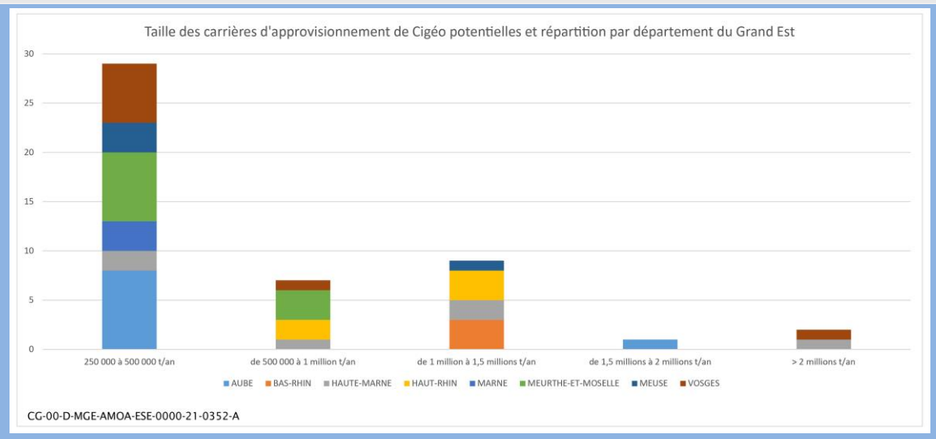


Figure 2-31 *Taille des carrières d'approvisionnement de Cigéo potentielles pour l'approvisionnement du centre de stockage Cigéo et répartition par département du Grand Est*

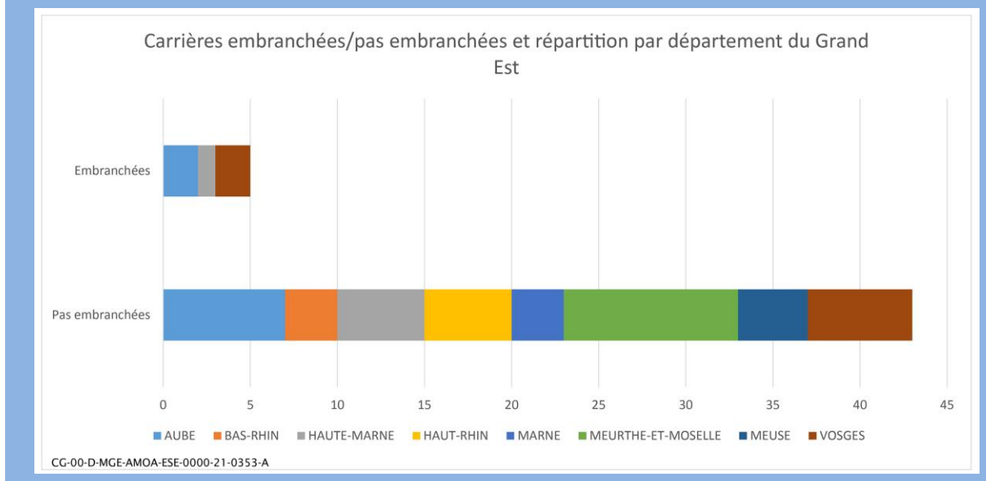


Figure 2-32 *Carrières embranchées/pas embranchées et répartition par département du Grand Est*

Par ailleurs, la construction du centre de stockage Cigéo génère une très grande quantité de matériaux excavés. Pour autant que leurs caractéristiques conviennent, leur recyclage en granulats pour la fabrication de béton ou la réalisation de travaux d'infrastructures sera recherchée, afin de réduire le recours à l'extraction de carrières.

Le ciment

Le ciment est un matériau qui entre dans la composition des bétons et des mortiers. Il est fabriqué à partir de calcaire et d'argile dans des cimenteries.

La région Grand Est accueille des cimenteries ou centres de broyage, dont la production annuelle totale s'élève à un peu moins de 3,2 millions de tonnes. Celle-ci couvre donc largement les besoins projetés pour le centre de stockage Cigéo, qui sont d'environ 180 000 tonnes l'année du pic de consommation, soit moins de 6 % de la capacité régionale. Si nécessaire, le centre pourra aussi s'approvisionner auprès

de cimenteries extrarégionales (ex : Jura, Pas-de-Calais). Les cimenteries sont toutes embranchées au réseau ferré. Les graphiques ci-dessous montre que la majeure partie de la production de ciment est localisée en Moselle à moins de 200 km du centre de stockage Cigéo. Une part notable de la production est aussi située dans la Marne et la Meurthe-et-Moselle à moins de 100 km du centre de stockage Cigéo ainsi que dans le Haut-Rhin et le Jura soit entre 200 et 300 km du centre de stockage Cigéo.

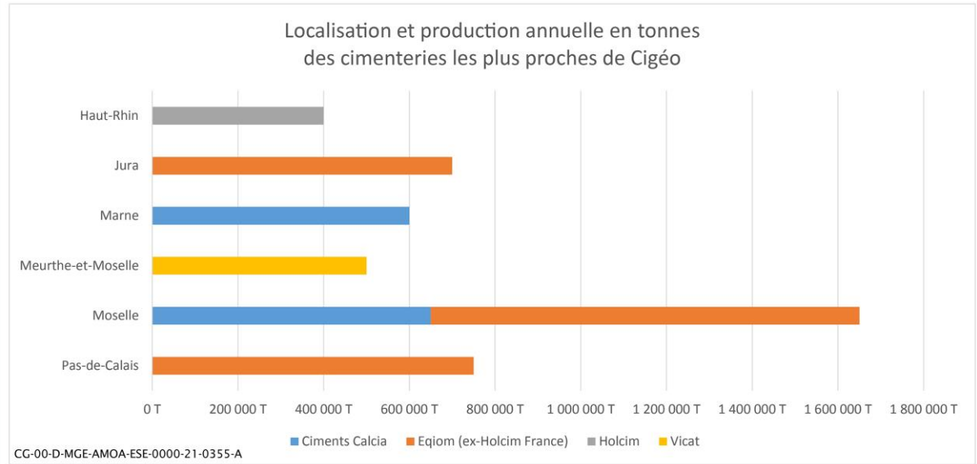


Figure 2-33 *Localisation et production annuelle en tonnes des cimenteries les plus proches du centre de stockage Cigéo*

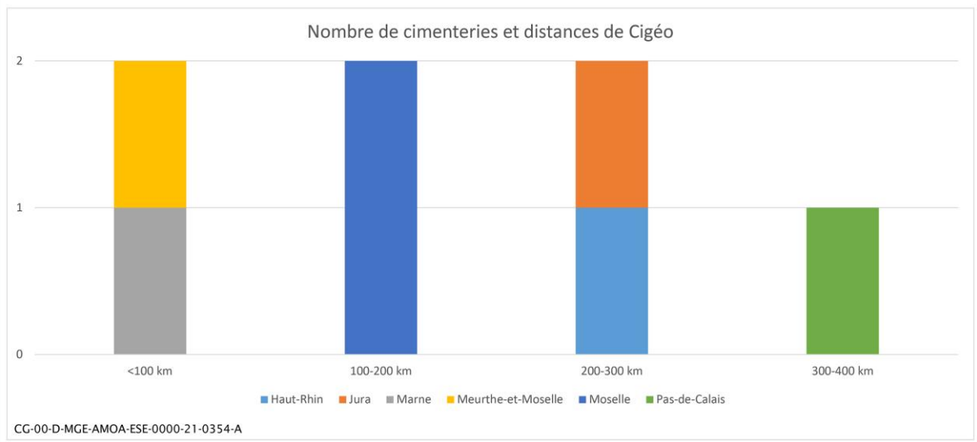


Figure 2-34 *Nombre de cimenteries et distances de par rapport au centre de stockage Cigéo*

2.3.1.5 Eau et milieu aquatique

Le dossier détaille les incidences possibles sur les eaux, mais sans évaluation chiffrée. Il ne précise pas la nature ni l'origine des pollutions et n'évoque pas non plus l'impact lié au stockage des verses, par ruissellement ou infiltration, voire même si les matériaux de verse doivent être « valorisés » en remblaiement de carrière. L'IRSN[53] note pourtant la présence dans l'argilite de 11 mg/kg d'arsenic et de 2.1 mg/kg d'uranium. Il relève que les lixiviats[54] issus des verses du laboratoire souterrain contiennent de fortes concentrations de sulfates (1 à 5 g/l) et de sodium (plus de 1 g/l).

2.3.1.5.1 Mesures d'évitement et de réduction

Le dossier prévoit différentes mesures d'évitement : implantation de la descenderie en dehors des zones de fracturation, réalisation des travaux en période d'assec au droit des cours d'eau temporaires, recyclage des eaux traitées, limitation des surfaces imperméabilisées. Le centre de stockage Cigéo est implanté à l'écart des zones inondables. Aucune information n'est cependant fournie sur le choix d'implantation des verses.

Il n'y aura pas de nouveaux prélèvements d'eau. Les besoins d'approvisionnement en eau potable (AEP) seront couverts par raccordement aux réseaux publics de distribution. Selon le dossier, il n'existe aucune incidence sur les captages AEP, bien que le centre de stockage soit inclus en partie dans le périmètre de protection éloigné du captage de Rupt-aux-Nonains : l'étude de faisabilité a

[53] Rapport IRSN n°2017-00013 Projet de stockage Cigéo —Examen du Dossier d'Options de Sûreté
[54] Le lixiviat est le liquide résiduel qui provient de la percolation de l'eau à travers un matériau, dont une fraction est soluble.

permis de vérifier que les débits prélevés sont adaptés à la capacité de recharge des captages et Cigéo respectera les prescriptions des périmètres de protection. Les autres besoins en eau seront couverts par le recyclage des eaux traitées. Pour l'Ae, le transfert des prélèvements d'eau potable sur le réseau public ne constitue pas une mesure d'évitement car la ressource exploitée restera la même.

Les effluents « non conventionnels » (contenant des traces de contamination radioactives) qui pourraient être produits ne sont pas rejetés dans le milieu, mais contrôlés radiologiquement et le cas échéant, traités avant transfert vers une installation agréée pour leur élimination. 150 l d'effluent par jour pourraient être produits avec une activité inférieure à quelques dizaines de Bq/l[55].

Les dispositions constructives de la zone descenderie et les liaisons surface-fond devraient réduire le drainage de la nappe. La conception de la paroi étanche en zone descenderie prévoit la mise en place de bulbes d'étanchéité et de revêtements au niveau des liaisons surface-fond.

La nappe des calcaires du Barrois et les nappes recoupées par le creusement des puits ont été modélisées[56] pour valider la conception retenue. Les incidences sur les usages ne seraient notables et permanentes que sur les seuls captages localisés dans le cône de rabattement de la nappe des calcaires du Barrois induit par la descenderie. La conception de la paroi étanche et des liaisons surface-fond doit faire l'objet d'une démarche itérative afin d'en réduire les incidences. Elle n'est pas aujourd'hui aboutie.

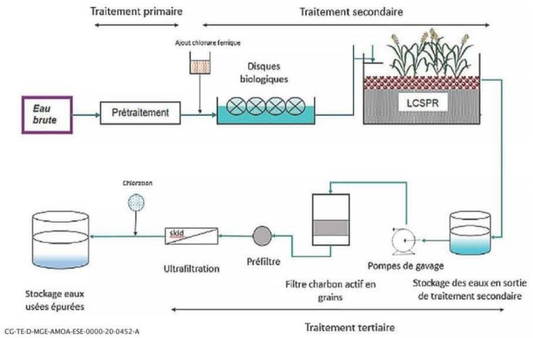


Figure 12 : Schéma de la filière de traitement des eaux usées et industrielles. Source dossier

Il est prévu des dispositifs de traitement des eaux très complets et prévoir des performances épuratoires élevées, compatibles avec la réutilisation des eaux à des fins industrielles, qu'il s'agisse des eaux pluviales, usées et industrielles, ou d'exhaure[57]. Ainsi, les deux stations d'épuration des eaux usées et industrielles des zones descenderie (1 700 équivalent-habitants) et puits (675 équivalent-habitants) comprendront un traitement secondaire constitué de disques biologiques couplés avec un lit de clarification-séchage planté de roseaux (LCSPR), suivi d'un traitement tertiaire allant jusqu'à

[55] Pour comparaison, l'activité de l'eau de mer est de l'ordre de 40 Bq/l

[56] Dans son avis n°2018-AV-0300 du 11/01/2018 relatif au DOS présenté par l'Andra pour le projet Cigéo, l'ASN émet des doutes sur la représentativité de cette modélisation hydrogéologique. > quels enjeux environnementaux ?

[57] Les eaux d'exhaure désignent les eaux pompées ou drainées des mines pour les maintenir hors d'eau malgré les infiltrations.

l'ultrafiltration et la désinfection aux UV. *A contrario*, la définition du traitement des eaux de ruissellement des verses n'est pas aboutie. Il était nécessaire de préciser la nature de ces traitements, sachant que ce ruissellement peut entraîner les polluants naturels contenus dans les argilites dont l'arsenic et l'uranium.

Avant traitement, toutes les eaux pluviales sont stockées dans un bassin dimensionné pour recevoir des pluies de deux heures d'intensité de fréquence biennale. Ces bassins peuvent servir de rétention en cas de pollution accidentelle. Ce dimensionnement est insuffisant, car il signifierait que les eaux de ruissellement seraient rejetées au milieu en moyenne plus d'une fois tous les deux ans, sans traitement, avec vraisemblablement une infiltration rapide vers la nappe.

L'Ae recommande d'augmenter les capacités de stockage des eaux de ruissellement.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R27

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants. Ceux-ci confirment que les principes de conception permettent bien de confiner une pollution accidentelle générée au sein du centre de stockage Cigéo ou des eaux d'extinction incendie tout en permettant le traitement d'une pollution chronique des eaux de ruissellement. Ces eaux traitées sont ensuite stockées vers des bassins quantitatifs dimensionnés de manière conséquente (pluie centennale) avant un rejet régulé vers le milieu naturel. De fait les pollutions chroniques ou accidentelles des eaux de ruissellement ne seront pas rejetées sans traitement, même ponctuellement, directement dans le milieu naturel sans transiter préalablement par ces bassins.

Rappel des principes de prévention des risques de pollution accidentelle

Certaines activités de travaux ou activités liées au fonctionnement du centre de stockage Cigéo peuvent être sources de pollutions accidentelles. Des mesures organisationnelles et techniques sont mises en œuvre pour les ouvrages identifiés afin d'en supprimer ou d'en limiter autant que possible, et cela au plus proche de la source, le risque de pollution associé.

Pour exemple, le chapitre 19.4 du volume IV de l'étude d'impact présente certaines mesures prisent durant les travaux, liées aux stockages de substances dangereuses (carburant, huiles de décoffrage…), aux aires de dépotage et d'utilisation des produits chimiques (ateliers, centrale à béton…) ou à l'approvisionnement en carburant des engins

Il est à rappeler également que les activités liées au fonctionnement du centre de stockage respectent les principes suivants :

- l'implantation et l'agencement des aires sensibles (aires carburant, aires de lavage, aires de stationnement, aires de stockage de produits…) se font à l'écart des voiries. Ces aires sont étanches, adaptées à la nature des produits qu'elles contiennent et munies de système de rétention ou de collecte ;
- les eaux pluviales qui sont récupérées sur ces aires sont prétraitées localement à l'aide de séparateurs d'hydrocarbures. Elles sont instrumentées (type sondes et poires de niveaux, alarmes déportées, arrêt d'urgence).

Globalement, la pollution accidentelle est gérée dans un premier temps au plus proche de l'évènement (intervention des systèmes de secours, utilisation de kit antipollution…) mais elle doit en dernier recours pouvoir être gérée à l'échelle de la filière de gestion des eaux pluviales.

Gestion des pollutions chronique et accidentelle dans les eaux de ruissellement

Les eaux pluviales sont collectées et traitées selon le bassin versant sur lequel elles ruissèlent. En effet, pour le cas particulier de la zone descenderie, deux bassins qualitatifs et un bassin quantitatif sont positionnés sur chaque bassin versant.

Les eaux pluviales recueillies sur les aménagements du centre de stockage Cigéo sont collectées et orientées dans un premier temps vers des bassins qualitatifs.

Ces bassins, étanches, ont trois rôles :

- le traitement de la pollution chronique ;
- le confinement de la pollution accidentelle issue d'un déversement d'hydrocarbures ;
  le confinement des eaux d'extinction incendie.
- **Gestion de la pollution chronique**
  Le principe de la gestion de la **pollution chronique** des eaux de ruissellement est de traiter le premier flot d'eaux pluviales susceptible de collecter la majorité des polluants accumulés sur les surfaces imperméabilisées (eaux de lessivage des sols). Ces bassins qualitatifs sont dimensionnés pour accueillir les 11 premiers millimètres de pluie. À Cirfontaines-en-Ornois, cet abattement de la pollution est atteint pour une pluie de cumul de hauteur 11 mm, soit très proche de la pluie de période de retour Tr = deux ans et de durée 15 minutes.
  Ces bassins qualitatifs intègrent un « volume mort » situé entre le fond du bassin et le fil d'eau de l'orifice de fuite. Ce volume restera toujours en eau. Il permet la décantation des effluents entrants dans le bassin en augmentant leur temps de séjour et en réduisant la vitesse. Il assure ainsi le traitement de la pollution chronique avant passage par des filtres à sable permettant la filtration des matières en suspension.
- **Gestion d'une pollution accidentelle ou des eaux incendies**
  Quand une pollution survient en dehors des aires sensibles évoquées précédemment, le réseau de collecte des eaux pluviales étant imperméable, le flux de polluant aboutit à la filière de gestion des eaux pluviale intégralement.
  Ces bassins qualitatifs doivent de fait également permettre le confinement **d'une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie.** Le dimensionnement correspondant consiste au stockage d'une pollution concomitante à une pluie de durée deux heures et de période de retour deux ans considéré comme scénario critique. Les eaux confinées sont ensuite pompées dans des camions citernes et évacuées à l'extérieur du site pour dépollution par une filière de traitement spécifique.

Dimensionnement des bassins

Ces bassins quantitatifs sont doublés, et dimensionnés à l'identique. Ce principe permet de **de maintenir l'exploitation,** à savoir d'assurer notamment le traitement de la pollution chronique avant transfert des eaux vers le bassin quantitatifs et cela malgré un confinement d'une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie par l'un des deux bassins.

Les marges de conception retenues actuellement permettent pour chaque bassin de reprendre soit deux épisodes de pollution chronique (2*11 mm) soit une pollution accidentelle ou la récupération des eaux incendie avec concomitance à une pluie de durée deux heures et de période de retour de 2 ans.

Ces bassins qualitatifs sont en fonctionnement continu et sont, de fait, équipés de bypass, en amont et en aval, permettant d'isoler le bassin ayant piégé une pollution accidentelle ou des eaux d'extinction incendie.

Après passage dans les filtres à sable, les eaux collectées sont dirigées vers le bassin quantitatif pour un rejet régulé vers le milieu naturel.

Les bassins quantitatifs, permettent quant à eux, d'écrêter les pluies majeures (temps de retour 10 ans et 100 ans) comme des événements pluviométriques plus fréquents (temps de retour deux ans et cinq ans) et ainsi assurer la non-aggravation des risques d'inondation

Les ouvrages des gestions des eaux pluviales retenus pour la LIS et L'ITE sont également munis de bassins étanches permettant le traitement de pollutions chroniques et accidentelles avant rejet.

2.3.1.5.2 Incidences résiduelles et besoins de compensation

Le dossier considère que l'incidence résiduelle ne reste notable que sur les nappes au droit de la zone de dépression piézométrique de la nappe des calcaires du Barrois. Il n'en est pas attendu sur les eaux superficielles, si ce n'est en cas d'incident ayant un impact sur l'environnement. L'Andra indique que des compensations des usages affectés seront mises en place au cas par cas, avec le gestionnaire de la ressource et les services de l'État. Pour l'Ae, il s'agit dès lors qu'aucune incidence résiduelle n'est retenue, de mesures d'accompagnement et non de compensation.

2.3.1.5.3 Mesures de suivi

Les modalités de suivi des mesures ERC comprennent le contrôle de la performance des dispositifs de gestion et de traitement des eaux. Un réseau est prévu pour le suivi des eaux superficielles, des zones d'expansion de crues, de l'hydromorphologie des cours d'eau et de la qualité des eaux recyclées. Le dossier renvoie pour la définition précise des protocoles aux prescriptions de l'arrêté d'autorisation de création et à celles des futurs dossiers de demandes d'autorisation environnementale (points de suivi, nature, fréquence…). Il est donc difficile d'émettre un avis à ce stade.

2.3.1.5.4 Conclusions de l'Ae sur la prise en compte de l'eau et des milieux aquatiques

Les informations produites restent qualitatives et parfois incomplètes, que ce soit sur les impacts, les mesures ERC ou le suivi. Les précisions attendues (volumes, performances, protocoles …) sont renvoyées aux étapes ultérieures. Il manque des évaluations chiffrées, notamment sur les besoins en eau, les ruissellements, les rejets. C'est une difficulté majeure pour juger des impacts, de la qualité des mesures ERC et de leur suivi et établir le caractère engageant pour le pétitionnaire de son étude d'impact.

L'impact du ruissellement, mais surtout de la percolation sur et dans les verses n'est qu'à peine évoqué, sans précision sur le type de traitement ni information sur les mesures d'évitement et de suivi de la pollution possible des nappes par percolation.

L'Ae recommande de quantifier et qualifier les impacts potentiels et résiduels sur les eaux et de préciser les mesures ERC, leurs objectifs de résultats et les protocoles de suivi, et de les compléter pour les impacts des eaux de ruissellement et de percolation des verses.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R28

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les compléments présentés ci-dessous au niveau des eaux de ruissellement et de percolation des verses. Les incidences résiduelles globales sur les eaux superficielles et souterraines restent inchangées.

Il est à noter que les quantifications détaillées, les caractéristiques qualitatives des rejets et les protocoles de suivi pour les eaux superficielles et souterraines seront précisés dans les dossiers de demande d'autorisation de création de l'INB et d'autorisation environnementale.

L'évaluation des incidences sur les eaux souterraines et les eaux superficielles est réalisée sur la base de l'état actuel du milieu physique et des caractéristiques du projet global Cigéo, présentés respectivement dans le volume III (cf. Chapitre 5) et dans le volume II de l'étude d'impact.

Les études de conception détaillée du projet ont également pour objectif de poursuivre la démarche Éviter – Réduire les incidences du projet sur les eaux souterraines et superficielles, c'est pourquoi les quantifications détaillées, les caractéristiques qualitatives des rejets et les protocoles de suivi pour les eaux superficielles et souterraines seront précisés dans les dossiers de demande d'autorisation de création de l'INB et d'autorisation environnementale.

Les trois grandes catégories d'effets potentiels identifiés sur les eaux sont les suivants:

- les incidences quantitatives ;
- les incidences qualitatives ;
- les incidences sur les usages.

La présente étude d'impact, qualifie pour chacune des catégories précitées, par opérations et phases de vie, l'ensemble des incidences potentielles puis résiduelles (après mesures).

Les incidences sont ensuite évaluées/mesurées au travers des méthodes présentées dans le volume VII de l'étude d'impact du projet global Cigéo (cf. Chapitres 1.1 et 5).

Les incidences sont de fait évaluées/quantifiées comme :

- non notables lorsque les niveaux d'incidences sont très faibles à faibles ;
- notables lorsque les niveaux d'incidences sont modérés à très forts.

L'identification et l'évaluation des incidences potentielles et résiduelles sur les eaux, la précision sur les mesures ERC et leurs effets ainsi que les modalités de suivi qui cadreront les protocoles de suivi sont déjà exposées dans l'étude d'impact dans les tableaux et chapitres présentés ci-après. Cependant des compléments ont été apportés au niveau des eaux de ruissellement et de percolation sur les verses.

Concernant les eaux souterraines

Le tableau 5.1-1 du volume IV de l'étude d'impact détaille (identification et évaluation) les incidences potentielles identifiées sur les eaux souterraines.

Les tableaux 5.2-2 et 5.2-3 présentent la synthèse des mesures d'évitement, de réduction et des modalités de suivi de ces mesures sur les eaux souterraines pour le centre de stockage Cigéo et pour les opérations des autres MOA.

Le chapitre 5.2.5.3 présente la synthèse et l'évaluation des incidences résiduelles sur les eaux souterraines.

Ces éléments seront précisés et détaillés dans le dossier de demande d'autorisation de création qui fera office de demande d'autorisation de rejet.

Concernant les eaux superficielles

Le tableau 5.1-2 du volume IV de l'étude d'impact détaille (identification et évaluation) les incidences potentielles identifiées sur les eaux superficielles.

Les tableaux 5.3-8 et 5.3-9 présentent la synthèse des mesures d'évitement, de réduction et des modalités de suivi de ces mesures sur les eaux superficielles pour le centre de stockage Cigéo et pour les opérations des autres MOA.

Le chapitre 5.3.5.3 présente la synthèse et l'évaluation des incidences résiduelles sur les eaux souterraines.

Ces éléments seront précisés et détaillés dans le dossier de demande d'autorisation de création qui fera office de demande d'autorisation de rejet.

- **Précisions apportées dès maintenant sur les impacts des eaux de ruissellement des verses.**

  Les eaux pluviales ruisselant sur les verses de la zone puits sont tout d'abord collectées par un fossé étanche qui les dirige vers le bassin qualitatif. Elles transitent ensuite vers un bâtiment de traitement complémentaire puis vers un bassin quantitatif avant rejet régulé vers le milieu naturel.

  L'analyse de la composition chimique des matériaux qui seront extraits du sous-sol pour constituer les verses afin d'évaluer le risque de transfert de matières solides toxiques dans l'air et les eaux est faite précédemment au travers de la réponse à la recommandation n° 4.

  Les objectifs de traitement tant pour les phases de construction initiale que de fonctionnement du centre de stockage Cigéo visent à obtenir une qualité d'eaux rejetées compatible avec le bon état chimique des eaux superficielles.

  La filière est composée de prétraitements (décantation avec coagulation /floculation, filtres 10 et 5 microns), puis affinage par la mise en place d'une osmose inverse basse pression (nanofiltration) :

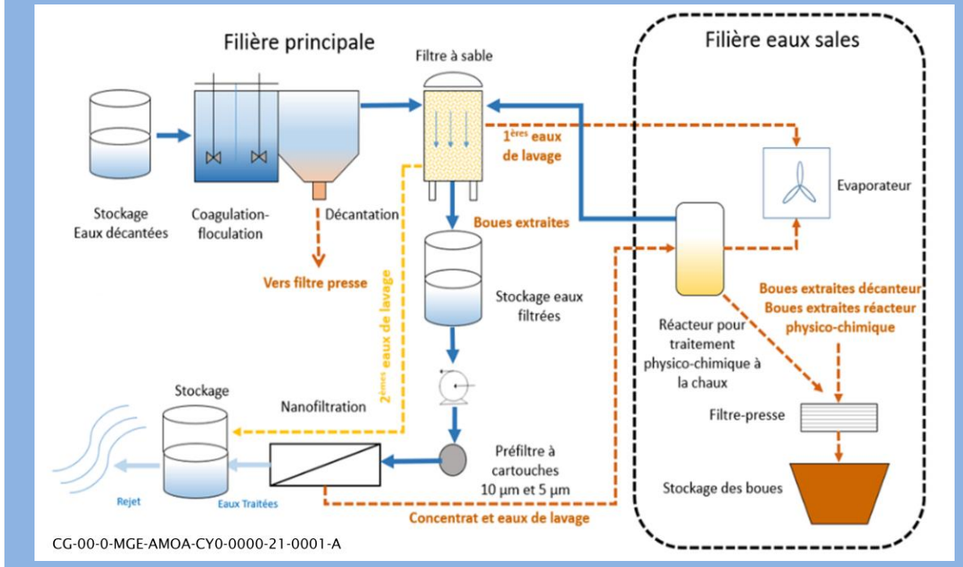


Figure 2-35 Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux de ruissèlement des verses

Du fait des traitements performants mis en place, l'incidence résiduelle sur la qualité des eaux superficielles associée au rejet des eaux de ruissellement des verses est non notable.

Il est à noter qu'en complément des paramètres physico-chimiques énoncés par la directive cadre sur l'eau (DCE), comprenant l'arsenic, vingt éléments complémentaires dont l'uranium sont analysés pour cette filière de traitement. Les concentrations en arsenic et en uranium des rejets liés aux ruissellement des eaux des verses sont nettement inférieures au seuil défini par la DCE pour l'arsenic et très en deçà des niveaux de radioactivité naturelle des eaux superficielles du secteur pour l'uranium (facteur 100).

- **Précisions apportées dès maintenant sur les impacts des eaux de percolation des verses.**

  La mise en dépôt des verses se fait à partir d'une assise embase compactée faiblement perméable. La réalisation des verses se fera ensuite par ajouts successifs de couches d'argilites qui seront compactées et contrôlées. Une couverture végétalisée est installée au fur et à mesure afin de protéger l'argile excavée des intempéries et d'en limiter les eaux d'infiltration dans les verses.

  Du fait des principes constructifs retenus et du contrôle qualité associé, la percolation des eaux dans les verses sera très faible. De fait, l'incidence résiduelle sur la qualité des eaux souterraines associée au rejet des eaux de percolation des verses est non notable.

Le projet s'est appuyé sur des moyens d'étude considérables et présente des solutions techniques de bon niveau. L'Ae s'est cependant interrogée sur les possibilités d'amélioration de la démarche

ERC, sans mobilisation de moyens supplémentaires conséquents, par approfondissement de certaines études : dimension des bassins de réception des eaux pluviales, osmose inverse en lieu et place de l'ultrafiltration, meilleure exploitation du modèle de nappe (simulation de nouveaux scénarios en particulier).

Ainsi, les possibilités d'infiltration vers la nappe d'eaux non polluées ou traitées en excédent ne sont pas étudiées. Bien entendu, cette possibilité devrait s'accompagner des études, des technologies, des mesures de sécurité et des contrôles adaptés[58]. Il s'agirait là non seulement d'une mesure de compensation du rabattement de la nappe des calcaires du Barrois, mais d'une amélioration de la gestion globale de l'eau sur un site en tête de bassin versant. Il en va de même des possibilités de production d'eau potable en circuit fermé sur site, soit à partir de forages sur la nappe réalimentée, soit à partir de traitements plus poussés de certaines eaux excédentaires.

Les possibilités de limitation des surfaces imperméabilisées ne sont que citées. Or, 100 ha imperméabilisés représentent de l'ordre de 250 000 m³ perdus pour la recharge annuelle des nappes et de l'ordre de 800 000 m³ de ruissellement annuel supplémentaire, avec un ruissellement de plusieurs dizaines de milliers de m³ pour les orages les plus violents.

L'Ae recommande d'approfondir la démarche ERC relative aux impacts quantitatifs sur la ressource en eau, en particulier pour ce qui concerne les possibilités de recharge de nappe et de réduction de l'artificialisation.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R29

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants qui confirment que l'ensemble de ces mesures Éviter / Réduire, comme le fait de privilégier le recyclage des eaux produites par les activités du centre de stockage Cigéo, de limiter la consommation de la ressource locale en eau, ou d'avoir une démarche de limitation des surfaces imperméabilisées, permettent pour le centre de stockage de limiter les impacts quantitatifs sur la ressource en eau tout en respectant les prescriptions qui s'imposent aux installations nucléaires de base.

Concernant les recharges de nappes et la production d'eau potable en circuit fermé (forages sur nappe réalimentée)

- **La conception du centre de stockage Cigéo privilégie la récupération des eaux produites par ses activités**, puis leur utilisation maximale après traitement pour répondre aux besoins ne nécessitant pas une eau potable au sens de la consommation humaine. Ainsi, sur chaque installation de surface (zone puits, zone descenderie) est implantée une station d'épuration traitant les eaux usées et industrielles de surface (cf. Chapitre 5.3.2.7 du volume IV) et un dispositif de traitement des eaux de fond (cf. Chapitre 5.3.2.8 du volume IV) recyclant ainsi les effluents pour réutilisation interne (fabrication des bétons, nettoyage, arrosage…)

  Pour précision, les ouvrages d'épuration du centre de stockage Cigéo doivent être considérés comme des installations traitant un mix d'effluents industriels et urbains ; c'est pourquoi l'éventail technologique proposé est plus vaste que le champ communément utilisé. La filière de traitement des eaux usées et eaux industrielles sera munie, en traitement tertiaire (cf. Figure ci-après), d'une osmose inverse basse pression (nanofiltration) en aval de l'ultrafiltration et de la filtration sur charbon actif en grain. L'ensemble de la filière permettra d'atteindre les rendements épuratoires fixés (obligation de résultats via les autorisations adéquates et la directive cadre sur l'eau), s'adaptant aux variations de charge d'entrée variables selon les périodes, tout en ayant une emprise limitée.

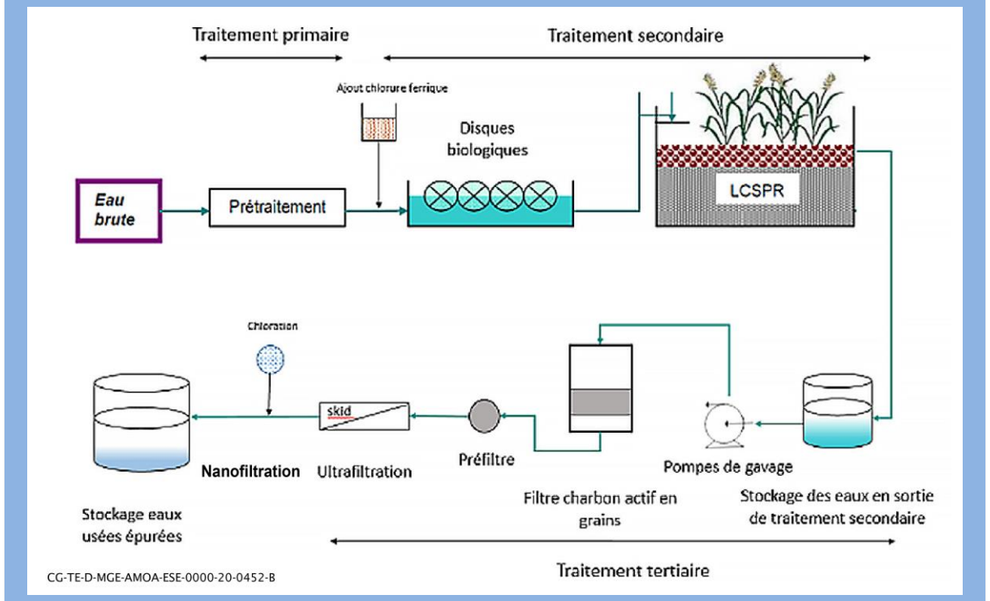


Figure 2-36 Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux usées et industrielles

- **Pour respecter les prescriptions qui s'imposent aux Installations Nucléaires de Base (INB)**

  « I. — Les rejets dans le sol et les eaux souterraines sont interdits, à l'exception des infiltrations éventuelles d'eaux pluviales dans les conditions définies aux articles 4.1.9 et 4.1.14 et des réinjections, dans leur nappe d'origine, d'eaux pompées lors de certains travaux de génie civil. » (cf. article 4.1.12 de l'arrêté du 7 février 2012 concernant les INB à propos des recharges de nappes).

  Ces prescriptions concernent tous les ouvrages de gestion des eaux qui sont situés dans le périmètre de l'INB où l'ASN est responsable du contrôle des installations.

  C'est pour cette raison que les possibilités d'infiltration vers la nappe d'eaux traitées sont limitées pour la conception du projet de centre de stockage Cigéo.

- **Pour limiter la consommation de la ressource locale en eau et pour ne pas aggraver un risque de pénurie pour les populations desservies,** il n'est prévu aucune création de forage dédié à l'alimentation en eau potable ou à un autre usage du centre de stockage Cigéo. Le besoin en eau du centre de stockage Cigéo est satisfait par un raccordement aux réseaux locaux d'alimentation en eau potable, les résultats de l'étude de faisabilité quantitative ayant permis de vérifier que les débits prélevés sont adaptés à la capacité de recharge des captages sollicités pour le besoin (cf. Chapitre 5.2.1.2 du volume IV de l'étude d'impact). De plus, le centre de stockage Cigéo est compatible avec les prescriptions des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable concernés (conforme aux arrêtés préfectoraux d'autorisation des captages d'alimentation en eau potable).

- **Limitation des impacts sur les eaux pluviales**

  Les eaux pluviales collectées sont quant-à-elles réintroduites dans leur bassin versant d'origine après une gestion qualitative et quantitative (cf. Chapitres 5.3.2.3 et 5.3.2.6 du volume IV de l'étude d'impact).

  De plus, les espaces verts non raccordés aux dispositifs de gestion des eaux pluviales sont conçus pour limiter ou retarder les ruissellements (gestion alternative des eaux pluviales à la parcelle) par infiltration directe des eaux dans le sol.

Concernant les possibilités de limitation des surfaces imperméabilisées

Une démarche de limitation des surfaces imperméabilisées a été entreprise dès le début de la conception du projet. Le résultat de ce travail est exposé dans le chapitre 5.3.2.1 du volume IV de l'étude d'impact. Pour le centre de stockage Cigéo, les zones d'interventions potentielles représentent en termes de surface imperméabilisée en fin de construction initiale par rapport à la surface de la zone potentielle d'intervention :

- 17 % pour la zone descenderie ;
- 13 % pour la zone puits ;
- 30 % pour la liaison intersites ;
- 16 % pour l'installation terminale embranchée.

Le chapitre 5.3.2.2 présente en complément les mesures de réduction envisagées pour limiter les surfaces imperméabilisées. Il s'agit notamment :

- du décapage progressif pour éviter une mise à nu de la totalité des zones d'intervention potentielle ;
- de l'aménagement des installations de surface favorisant les espaces verts et la gestion alternative des eaux de pluie à la parcelle ;
- du déploiement progressif des verses et leur végétalisation ;
- de la conception de certains bâtiments au sein du centre de stockage avec des toitures végétalisées.

2.3.1.6 Milieux terrestres et humides

2.3.1.6.1 Descenderie et liaison intersites

La descenderie est implantée en milieu essentiellement agricole où elle occupera une surface de 269 ha. Les principaux enjeux se situent à l'ouest dans la vallée de l'Orge ainsi qu'au niveau de la rivière Bureau. Les mesures d'évitement intègrent la préservation d'une bande de 24 ha de milieux cultivés et prairiaux au bord de l'Orge et une bande périphérique de 14 ha en bordure de clôture de l'ensemble de la descenderie. En matière de réduction, des mesures de prévention des risques de pollution du chantier sont prévues, ainsi que la réduction de l'éclairage, la création de passages à faune, l'enlèvement des caches à reptiles et amphibiens, ainsi que le traitement des espèces exotiques envahissantes qui sera réalisé sans utilisation de pesticides. Le dossier identifie des incidences résiduelles fortes après évitement et réduction seulement sur les éléments structurants du paysage autour de l'Orge, toutes les autres sont considérées comme faibles à très faibles. Aucune incidence résiduelle moyenne à très forte n'est identifiée sur la liaison intersites.

2.3.1.6.2 Zone puits

L'implantation de la zone puits dans le bois Lejuc nécessite le défrichement de 230 ha entraînant la destruction de près de la moitié de 527 ha de forêts Les incidences résiduelles sont importantes notamment pour les oiseaux, les mammifères terrestres et chauves-souris. Le dossier souligne que les enjeux concernant les reptiles étant concentrés sur les lisières, les incidences seront moyennes. Les incidences sur les amphibiens seront également moyennes du fait de l'absence d'emprise sur la vallée de l'Ormançon. Enfin, les stations de flore à enjeu sont situées en dehors des emprises.

[58] Il pourrait d'ailleurs être démontré, par modélisation ou calcul simple, que jusqu'à un certain débit, cette infiltration au droit du cône de rabattement de la nappe s'effectue sans que cette eau n'atteigne un captage.

2.3.1.6.3 Installation terminale embranchée

L'installation terminale embranchée évitera les zones humides et préservera la végétation sur les espaces en remblai. L'installation ne sera pas clôturée afin de permettre la circulation de la faune. Les incidences résiduelles sont néanmoins importantes avec les destructions suivantes sur 269 ha :

- habitats naturels communautaires non prioritaires ;
- trois stations de Mélique ciliée, espèce végétale protégée en Lorraine ;
- habitats d'intérêt fort et moyen pour les insectes (Flambé, Cuivré des marais, Azuré bleu céleste, Mélitée des digitales, Œdipode germanique, Zygène de la coronille) ;
- habitats d'intérêt moyen à fort pour les reptiles ;
- habitats pour les chauves-souris (30 arbres gîtes potentiels détruits).

2.3.1.6.4 Zones humides

Plusieurs zones humides pourraient être asséchées pendant les travaux et le fonctionnement du centre de stockage du fait des rabattements de nappe qui seront opérés notamment sur la zone de descenderie. Plusieurs constructions sont susceptibles de se trouver dans des zones humides, ou de les affecter partiellement, notamment en phase travaux. Le maître d'ouvrage du projet a pris soin de respecter le devenir des eaux dans chacun des bassins versants ce qui devrait contribuer à réduire les effets sur les zones humides. L'accompagnement des chantiers par un écologue est prévu afin de repérer les éventuels impacts des travaux sur les zones humides, identifiées dont l'identification devra être approfondie en phase ultérieure, et de mettre en place les mesures d'évitement, de réduction et de compensation appropriées.

2.3.1.6.5 Continuités écologiques

Les circulations dans les milieux ouverts pourront être perturbées par les infrastructures linéaires comme la liaison intersites ou l'installation terminale embranchée. La mesure de réduction proposée consiste à créer des ouvrages de franchissement sous les voiries en lien avec le réseau hydraulique.

D'après le dossier, l'incidence du projet sur le corridor forestier régional au nord de la zone puits ne sera effective que vers les années 2070 dans la mesure où la valorisation des verses n'aurait pas abouti. Cette interprétation est contestable car la destruction du bois Lejuc aura inévitablement un impact sur la fonctionnalité de ce corridor et du réservoir de biodiversité que représente ce boisement. De plus, un « effet entonnoir » risque d'être induit par la concentration de la circulation des espèces au nord du bois. Il est difficile de restreindre la fonction corridor à la partie nord du bois Lejuc sans imaginer que le réservoir de biodiversité constitué par l'ensemble du bois est utilisé par les espèces lors de leurs déplacements. Ainsi l'incidence sur les continuités écologiques traversant le bois Lejuc doit être considérée comme forte dès le début des travaux de défrichement et non pas, comme le déclare le dossier, dans une hypothétique étape ultérieure.

L'Ae recommande de mettre en œuvre la séquence éviter, réduire, compenser sur le corridor forestier régional qui traverse le bois Lejuc en prévision des impacts des premiers travaux de défrichement.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R30

L'Andra prend acte de cette recommandation. Pour tenir compte de la recommandation de l'Ae, l'Andra a complété les mesures proposées en mettant en œuvre dès les premiers travaux de défrichement la création d'un réseau de haies entre la forêt de Grammont et le nord du bois Lejuc.

En propos liminaire, il convient de rappeler les différentes mesures d'évitement et de réduction d'ores et déjà incluses dans le dossier dans les chapitres 6.3.1 et 6.3.2 du volume IV de l'étude d'impact ainsi que leurs effets sur le corridor forestier régional.

De manière à maintenir les déplacements des espèces en lisière est du bois Lejuc et à préserver la vallée de l'Ormançon, classée Espace Naturel Sensible (ENS) et Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF), une bande boisée de 200 m de large est conservée sur tout le flanc est de la zone puits. En lisière ouest, une deuxième bande boisée d'une largeur de 100 m est également maintenue, afin de constituer un écran végétal pour le projet en interface avec les cultures adjacentes et de maintenir la continuité écologique, en particulier pour les mammifères et chiroptères présents sur cette zone.

S'ajoute à cela, la préservation d'une zone boisée sur 200 m minimum (à terminaison) entre la limite nord de la zone puits et le chemin rural dit de Ribeaucourt à Bonnet. Cette mesure permet de préserver le boisement au niveau du corridor écologique identifié et de favoriser la continuité vers le nord du massif forestier.

Une partie de la Chênaie-Charmaie présente au sud du bois Lejuc (environ 1,1 ha) est préservée au sein de la zone puits assurant le rôle de zone relais pour la faune volante.

La figure 2-37 présente ces différentes mesures de maintien de surfaces boisées dont l'Andra est propriétaire. Elles constituent non seulement une préservation de zones refuges pour la faune, compte tenu de leurs dimensions mais elles permettent aussi de maintenir les principaux corridors écologiques identifiés, que sont les lisières forestières est et ouest du bois Lejuc.

Malgré les défrichements nécessaires à l'implantation de la zone puits, les déplacements diffus de la faune restent possibles au sein du boisement restant en place. Il convient en effet de rappeler que le défrichement sera progressif depuis l'extrémité sud du massif. Il concernera 50 % de la surface du boisement classée en ZNIEFF mais ceci représente moins de 10 % de la surface totale du boisement.

Aussi, l'Andra a pris note des remarques formulées par l'Autorité Environnementale et a anticipé la mise en œuvre de la mesure MR15 consistant à la création d'un réseau de haies entre la forêt de Grammont et le nord du bois Lejuc dès les premiers travaux de défrichement. Le chapitre 6.3.2.15 du volume IV de l'étude d'impact décrivant cette mesure a été modifié en ce sens. Ce réseau de haie permettra une amélioration fonctionnelle significative des continuités écologiques est-ouest entre les boisements ; cet axe de déplacement étant actuellement restreint à trois secteurs privilégiés au niveau des vallées de la Forge, de la Fontaine et de Putinval. La création de ce réseau de haies multi-strates ainsi que d'une bande enherbée de 5 mètres multipliera les voies de passages au sein de la vallée de l'Orge, contribuera à limiter l'éventuel « effet entonnoir » et ainsi à réduire significativement les incidences du projet sur cette continuité. L'Andra s'engage également à planter des espèces mellifères[12] et fructifères d'origine locale (dite indigènes) afin de fournir une nourriture diversifiée à la faune.

Outre la maîtrise du foncier, et afin de garantir la pérennité de la mesure, des études sont en cours afin de proposer des renforcements de haies existantes au sud-est de la vallée de l'Orge. La description technique détaillée de cette mesure ainsi que les modalités de suivi seront complétées en fonction des résultats des prospections foncières dans les prochaines actualisations de l'étude d'impact.

[12] Les plantes mellifères sont les plantes produisant de bonnes quantités de nectar et de pollen de bonne qualité et accessibles par les abeilles.

Figure 2-37 Illustration du maintien des bandes boisées au niveau la zone puits

2.3.1.6.6 Mesures de compensation

Le dossier procède à l'estimation de la dette écologique sur la base de l'ensemble des incidences résiduelles sur chacun des habitats concernés par le projet. La méthode utilisée, intitulée « Méthode miroir », consiste à évaluer « en miroir », d'une part la dette écologique liée aux incidences du projet

sur les habitats et les espèces, d'autre part le gain écologique des mesures de compensation proposées. La qualification des habitats est réalisée par les bureaux d'étude en charge du volet faune-flore de l'étude d'impact. L'Ae suggère que compte-tenu de l'ampleur exceptionnelle du projet, les avis d'experts soient validés par un conseil scientifique. Cela permettrait également de statuer sur l'intérêt écologique du bois Lejuc qui est considéré dans le dossier comme relativement banal bien qu'il soit situé en Znieff (cf. § 2.1.2.3 et § 2.2.6).

La méthode utilisée est conceptuellement proche de la méthode préconisée par le ministère de la transition écologique (MTE)[59] dans le cadre de la mise en œuvre de la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages du 8 août 2016. Cette méthode de réparation du préjudice écologique concerne les préjudices graves, ce qui est le cas de Cigéo étant donné l'étendue des emprises sur les milieux naturels et la durée du projet.

Plusieurs éléments de la méthode préconisée par le ministère diffèrent de la méthode employée par l'évaluation environnementale du projet Cigéo, notamment :

- les habitats pris en compte sont ceux de la nomenclature européenne Eunis (4e et 5e niveau) et non ceux de la classification Corine Biotopes[60], en particulier les habitats de type grande culture ne sont pas retenus ;
- les notions de succession et de trajectoire écologique présentes dans la méthode du MTE sont absentes de la méthode miroir ;
- le facteur multiplicateur utilisé par le MTE varie entre 1 et 5[61], il prend notamment en compte la connectivité des écosystèmes ;
- la méthode du MTE utilise un facteur d'actualisation qui est de 3 % pour les gains obtenus après un délai de 10 à 50 ans, ce qui appliqué à une forêt qui est mature en trente ans revient à lui affecter une valeur unitaire aujourd'hui de 0,4.

Les zones humides seront compensées par des mesures spécifiques ; l'Andra s'engage à compenser les impacts avec un ratio surfacique double. L'Ae observe que des outils fondés sur l'analyse des fonctionnalités existent et que la méthode MTE peut aussi être utilisée.

L'Ae recommande :

- ***de justifier l'utilisation de la méthode miroir pour le calcul de la dette écologique, en lieu et place de la méthode préconisée par le ministère de la transition écologique ;***

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R31

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes pour justifier l'utilisation de cette méthode.

En propos liminaire, il convient de rappeler que la méthode « miroir » développée par le bureau d'étude Biotope a déjà été appliquée dans le cadre de grands projets d'aménagement. Les principes de cette méthode ont d'ailleurs été exposés et discutés en commission plénière du CSRPN (Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel) de la région Grand Est le 25/06/2018. Le CSRPN n'a pas remis en cause et a même accueilli favorablement l'approche retenue pour le dimensionnement de la compensation écologique du projet.

La méthode d'évaluation biophysique exposée dans le guide Théma « *Comment réparer des dommages écologiques graves ?* » (2018) (44) s'applique à des responsables de dommages écologiques accidentels ou intentionnels graves. Ce guide ne s'adresse pas en premier lieu à des acteurs (maitres d'ouvrages ou bureaux d'études) chargés de concevoir et de mettre en œuvre des mesures de compensation dans le cadre de projets d'aménagement publics ou privés. Cette méthode fournit toutefois un cadre d'évaluation commun et vient en aide à l'application de la réglementation en vigueur. En revanche, elle ne présente pas de caractère normatif.

Sur la base des études 2017-2020 ayant conduit au rapport de l'OFB intitulé « Dimensionnement de la compensation ex ante des atteintes à la biodiversité : État de l'art des approches, méthodes disponibles et pratiques en vigueur » paru le 07 septembre 2020 (45), l'Andra et ses partenaires (CDC Biodiversité et Biotope) ont fait le choix, pour le projet global Cigéo, d'anticiper les préconisations du guide « Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique » porté par le ministère de la Transition Écologique et Solidaire. L'élaboration de ce guide paru le 1er juin 2021 a été lancée en 2018 dans le cadre de la mise en œuvre de l'action 90c du Plan Biodiversité (2018) (46), faisant suite au rapport du Sénat n° 517 du Sénateur Ronan Dantec (2017) (47). Il est le fruit de nombreux échanges entre l'équipe projet constituée du CGDD, de l'OFB et du CEREMA, et d'un groupe de travail composé de représentants des acteurs de la compensation écologique (bureaux d'études, opérateurs de compensation, chercheurs, maîtres d'ouvrage, services instructeurs, organisations non gouvernementales, associations de protection de l'environnement, et aménageurs). De par la participation active de CDC Biodiversité et de Biotope à ce groupe de travail, l'Andra s'est assurée au fil de l'avancement des discussions de la bonne adéquation de la méthode miroir et de son évolution aux exigences de ce guide.

Ce guide développe ainsi une approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique, avec plusieurs objectifs. En premier lieu, face à la multiplicité des méthodologies existantes en France et à l'international, le guide vise à standardiser les pratiques de dimensionnement des mesures de compensation pour qu'elles atteignent les objectifs de la compensation écologique. L'atteinte de l'équivalence écologique entre pertes et gains, en lien avec l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité, en fait notamment partie. En particulier, face à la nécessité de ne pas définir un encadrement trop strict, qui s'avèrerait inadapté pour l'échelle nationale, l'approche standardisée n'impose pas une méthode de dimensionnement unique, valable partout et en tout le temps. Elle fournit un cadre standard au sein duquel chacune des méthodes de dimensionnement (existantes ou nouvelles) devra s'inscrire, de façon à homogénéiser les pratiques.

Pour les opérations des autres maitres d'ouvrages, les relevés et les études des fonctionnalités sont en cours. L'évaluation des incidences sur les zones humides sera précisée dans les études d'impact portant les dossiers d'autorisation de ces opérations.

Il est précisé au chapitre 6.5.2.1 du volume IV de l'étude d'impact que l'Andra s'engage à mettre en œuvre des mesures de compensation des zones humides pour le double de la surface conformément aux prescriptions du SDAGE Seine Normandie 2016-2021, version en vigueur à la date de rédaction de l'étude d'impact, en s'appuyant sur le « *guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides* » de l'ancienne ONEMA et du MNHN paru en 2016 (48). L'Andra se propose d'apporter une précision complémentaire dans ce chapitre en garantissant que le ratio d'équivalence fonctionnelle soit porté à une valeur minimale de deux.

- *de faire évaluer et valider les propositions de quotas de compensation par un conseil scientifique indépendant ;*

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R31

L'Andra prend acte de cette recommandation et note l'intérêt que pourrait présenter la création d'une telle instance.

Il pourrait ainsi se réunir régulièrement de manière indépendante pendant toute la durée de la mise en œuvre et du suivi de la compensation.

Le conseil scientifique pourrait avoir pour mission une fonction de veille, de conseil, d'alerte et de réflexion prospective sur l'ensemble des questions scientifiques concernant le patrimoine naturel terrestre et aquatique, qu'il s'agisse de paysages, d'écosystèmes, d'espèces ou de génomes.

Afin de garantir l'indépendance d'un tel conseil scientifique en phase d'instruction du projet, il n'appartient pas à l'Andra de le constituer, ni d'en définir sa gouvernance.

- *évaluer les besoins de compensation des zones humides sur la base de leur fonctionnalité ;*

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R31

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants portant à la fois sur la méthodologie utilisée et la définition des mesures Éviter – Réduire – Compenser.

Il convient de rappeler que suite à l'application des différentes mesures d'évitement décrites au chapitre 6.3 du volume IV de l'étude d'impact, le projet de centre de stockage n'a pas d'emprise directe sur les zones humides identifiées au droit des installations. En ce qui concerne les incidences indirectes, elles sont considérées comme improbables au vu de l'état de connaissance du fonctionnement des zones humides, et n'appelant donc pas la mise en œuvre de mesures compensatoires. Les programmes complémentaires de caractérisation du Barrois viendront améliorer la quantification des incidences indirectes du projet sur les fonctionnalités des zones humides comme annoncé au chapitre 6.5.2.1 du Volume IV de l'étude d'impact.

Pour les opérations des autres maitres d'ouvrages, les relevés et les études des fonctionnalités sont en cours. L'évaluation des incidences sur les zones humides sera précisée dans les études d'impact portant les dossiers d'autorisation de ces opérations.

Il est précisé au chapitre 6.5.2.1 du volume IV de l'étude d'impact que l'Andra s'engage à mettre en œuvre des mesures de compensation des zones humides pour le double de la surface conformément aux prescriptions du SDAGE Seine Normandie 2016-2021, version en vigueur à la date de rédaction de l'étude d'impact, en s'appuyant sur le « *guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides* » de l'ancienne ONEMA et du MNHN paru en 2016 (48). L'Andra se propose d'apporter une précision complémentaire dans ce chapitre en garantissant que le ratio d'équivalence fonctionnelle soit porté à une valeur minimale de deux.

- ***de revoir l'équivalence géographique sur des critères éco-géographiques et non administratifs.***

[59] Thema décembre 2018. Comment réparer les dommages écologiques graves ?
[60] Une correspondance est disponible sur le site du Museum national d'histoire naturelle
[61] Il est égal à la somme de 1 + facteur d'enjeu écologique (0 à 0,5) + fiabilité (0 à 0,5) + équivalence géographique (0 à 1,5) + connectivité (0 à 1,5)

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R31

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes pour justifier l'approche retenue.

L'Andra a souhaité favoriser l'implantation de ces sites de compensation dans les départements d'accueil de son projet, à savoir la Meuse et la Haute-Marne (cf. Chapitre 6.3.2.2 du volume VII de l'étude d'impact). La localisation des sites de compensation écologique est surtout choisie pour rester dans la même unité biogéographique que les sites impactés à savoir la région naturelle du Barrois et à distance fonctionnelle pour la plupart des espèces impactées (mammifères terrestres, chiroptères, oiseaux). Cette cohérence sera mise en avant dans le descriptif de chaque site de compensation au travers des plans de gestion et qui viendront amender les versions ultérieures de l'étude d'impact.

Un autre critère constituait également à tenir compte des continuités et équilibres écologiques, ce qui s'est notamment traduit par le fait de privilégier des sites situés à l'intérieur des grandes infrastructures de communication, principalement la route nationale N4 et l'autoroute A31, qui peuvent constituer une barrière aux déplacements de la faune terrestre. Hormis le site de l'abbaye de l'Étanche, retenue essentiellement pour ses grandes potentialités de restauration, tous les sites de compensation s'inscrivent à l'intérieur du périmètre délimité par les grandes infrastructures de transport.

2.3.2 Milieu humain

2.3.2.1 Services écosystémiques

Les mécanismes envisagés pour la compensation agricole et sylvicole sont réservés aux deux départements de la Haute-Marne et de la Meuse. Ainsi, les surfaces à vocation agricole ou sylvicoles du département des Vosges, plus proches que beaucoup de parcelles des deux départements concernés sont exclues de la compensation. L'Ae considère que le découpage administratif n'a pas lieu d'être un critère de choix des parcelles de compensation, choix qui doit rester motivé par des considérations de géographie physique et d'environnement.

La compensation agricole telle que mise en œuvre dans le projet, que l'on peut analyser comme une compensation de la perte de services écosystémiques de production alimentaire végétale et animale, est financière. Elle consiste à financer des projets d'intensification de la performance agricole sans accroître la surface exploitée. En tenant compte des espaces consommés par la compensation écologique, la surface agricole à compenser s'élève à 580 ha. La perte économique annuelle correspondante est estimée entre 370 000 € et 440 000 €. Un fonds sera créé afin de soutenir les projets de compensation innovants des départements de la Meuse et de la Haute-Marne permettant une augmentation de la valeur ajoutée agricole. Sont ainsi envisagés des projets visant la modernisation de l'industrie laitière et fromagère, la diversification des productions agricoles, la production de biomasse et d'agro-matériaux.

Le dossier ne mentionne pas de conditionnalité environnementale associée à ces projets. L'Ae observe que la compensation agricole du projet Cigéo, y compris du fait des surfaces agricoles consommées par les mesures compensatoires écologiques, pourrait engendrer des impacts environnementaux, par exemple du fait de l'éventuel usage de fertilisants ou de pesticides ou de tout autre effet d'exploitations intensives, qui ne sont pas évalués par le dossier.

La compensation sylvicole est conçue comme devant privilégier des projets de travaux de boisement ou de reboisement et d'amélioration de parcelles à vocation sylvicole dégradées. Le versement d'une soulte au fonds stratégique de la forêt et du bois est également prévu. Les surfaces de compensation seront ajustées au fur et à mesure des défrichements ; pour la première phase une surface de 275 ha est envisagée, soit le double de la surface défrichée. Si les surfaces concernées sont situées de préférence à proximité du site, seuls les boisements des départements de la Meuse et de la Haute-Marne sont concernés.

L'Ae recommande de justifier l'absence de recherche de surfaces agricoles de substitution permettant d'éviter l'intensification et d'évaluer les incidences environnementales des projets de compensation agricole financés par le fonds de compensation, notamment pour ce qui concerne l'usage éventuel de fertilisants ou de pesticides ou d'intensification de l'exploitation, et de proposer des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation des impacts éventuels.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R32

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants rappelant la démarche retenue ainsi que les moyens envisagés à ce jour pour une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

Parmi les modalités de compensation agricole collective étudiées, la reconquête pour un usage agricole d'emprises foncières délaissées, comme indiqué dans de l'étude d'impact (Pièce 6, Volume IV § 8.1.5.1), n'a pas abouti et ceci pour plusieurs raisons :

- les friches sont rares et difficilement accessibles pour être cultivables : peu productives, présentant des enjeux environnementaux (biodiversité riche…) ;

- la demande de conversion pour un usage agricole d'anciens terrains militaires a été refusée à plusieurs reprises face au risque de pollution des sols et au risque pyrotechnique lié à la présence d'anciennes munitions.

La modalité de compensation retenue repose sur la constitution d'un fonds de compensation agricole collective ayant pour objectif d'accompagner des projets novateurs permettant :

- le développement de nouvelles filières de production et de transformation à forte valeur ajoutée et créatrices d'emplois (alimentaire ou énergétique) (Pièce 6, volume IV § 8.1.5.1) ;
- l'amélioration de la compétitivité des outils industriels existants.

Les projets s'inscriront dans les objectifs du territoire de « développer une agriculture adaptée et des produits de qualité à l'export et en proximité » (objectif 8 du SRADDET) (Pièce 6, Volume IV § 8.3.1).

Le souhait est de renforcer les filières locales, les circuits courts et de faire évoluer les modalités de gestion et les pratiques agricoles afin de les rendre plus respectueuses de l'environnement. Les projets qui seront mis en place dans le cadre de la compensation collective agricole devront contribuer à cet objectif et valoriser les activités agricoles locales dans le respect d'une agriculture durable.

Afin de favoriser la dynamique de territoire, l'Andra a sollicité les Chambres d'Agriculture et les opérateurs économiques locaux pour réfléchir aux projets qu'il conviendrait de développer dans le cadre de cette compensation collective agricole. Ont émergé des projets (Pièce 6, volume IV § 8.1.5.2) visant en particulier à :

- moderniser et développer les outils de production de l'industrie laitière et fromagère ;
- favoriser la diversification des productions agricoles (production de protéines végétales et animales, culture de champignons…) ;
- et développer des activités durables de production et de valorisation (production de biomasse-énergie, d'agro-matériaux pour l'isolation du bâti).

Les acteurs locaux de la profession agricole seront associés à la mise en œuvre de la compensation agricole collective dès la phase de définition des critères de sélection des projets. En effet, les projets seront retenus après avis du comité de pilotage qui veillera à leur mise en place et au suivi de la compensation agricole collective. Ce comité comprendra des représentants de la profession agricole, d'organismes consulaires, d'organismes économiques, des services de l'État, de représentants de collectivités et d'associations du territoire et de l'Andra.

La sélection des projets reposera sur un cahier de charges qui précisera les critères à satisfaire et qui permettront de s'assurer en particulier que les projets :

- soient fédérateurs de plusieurs acteurs économiques ;
- intègrent des engagements de conception environnementale et de développement durable du territoire et notamment qu'ils soient économes en espaces agricoles et naturels et en ressources (eau potable, énergie).

Une première proposition de critères d'éligibilité des projets est présentée dans le tableau 5.3.1 de l'étude préalable agricole et dans l'étude d'impact (Pièce 6, volume VII § 8.5). Elle sera complétée après échanges avec le comité de pilotage pour prendre en compte :

- la préservation de la ressource en eau (article L. 211-1 du code de l'environnement) ;
- la protection du patrimoine (article L. 341-1 du code de l'environnement et des sites Natura 2000 (article L. 414-1 du code de l'environnement) ;
- la minimisation des émissions de gaz à effet de serre (article L. 229-1 du code de l'environnement).

Ainsi, l'Andra s'engage à financer dans le cadre de cette compensation des projets durables et respectueux de l'environnement.

L'Andra informera le préfet de la mise en œuvre de la compensation collective agricole selon une périodicité adaptée à leur nature (article D. 112-1-22 du code rural et de la pêche maritime).

Par ailleurs, les mesures de compensation écologique en milieu ouverts concernent des surfaces actuellement cultivées. L'exploitation des surfaces de milieux ouverts dédiées aux mesures de compensation écologique, compte tenu de leur objectif de gain de biodiversité, repose de fait sur des méthodes respectueuses de l'environnement.

Comme indiqué dans le vol IV § 8.1.3 de la pièce 6, le changement des modes d'exploitation des terrains concernés par ces mesures écologiques a un impact économique limité sur les productions, les achats (agrofourniture et machines) et la main d'œuvre. Les modes d'exploitation, mis en œuvre dans le respect de la biodiversité, pourront être valorisés pour promouvoir une agriculture écoresponsable et durable, réduisant l'apport en fertilisants et en produits phytosanitaires, s'éloignant ainsi d'une exploitation intensive habituellement pratiquées.

L'exploitation de ces parcelles est confiée à des exploitants agricoles dans le cadre d'un bail rural environnemental (BRE) afin de garantir la pérennité des mesures de compensation environnementale en milieux ouverts.

En effet, les mesures de compensation environnementale envisagées sur les sites sélectionnés s'intègrent parfaitement aux clauses environnementales prévues par l'article R. 411-9-11-1 du code rural et de la pêche maritime pour établir un bail rural environnemental, en particulier :

- le non-retournement des prairies et la gestion des surfaces en herbe par exemple en pâturage extensif ou fauche tardive ;
- la mise en défense de parcelles ou de parties de parcelle (notamment par la mise en place de clôtures fixes ou temporaires et le respect de zones non récoltées) ;
- la limitation ou l'interdiction des apports en fertilisants et des produits phytosanitaires ;
- la couverture végétale du sol périodique ou permanente pour les cultures annuelles ou pérennes ;
- l'implantation, le maintien et les modalités d'entretien de couverts spécifiques à vocation environnementale (par exemple des jachères ou des couverts d'inter-culture labellisés «Agrifaune») ;
- l'interdiction d'irrigation, de drainage et de toutes autres formes d'assainissement ;
- la diversification des assolements et les techniques de travail du sol comme la culture sans labour ;
- la conduite de cultures ou d'élevage suivant le cahier des charges de l'agriculture biologique.

La gestion des cultures sur ces surfaces dédiées aux mesures de compensation écologique pourra illustrer les bénéfices d'une agriculture durable et aider à son développement. La mise en œuvre de toutes ces mesures favorise une agriculture respectueuse de l'environnement.

2.3.2.2 *Risques sanitaires*

Le dossier comporte une évaluation des risques sanitaires sous forme d'un volume séparé. Cette évaluation examine les effets des nuisances physiques, chimiques et radioactives. Comme indiqué en tête du chapitre 2.3 les conséquences sanitaires de situations accidentelles ne sont pas évaluées.

2.3.2.2.1 Nuisances physiques

Les bruits du chantier, sur une dizaine d'années, seront liés au fonctionnement des engins de terrassement et de creusement et à la circulation des camions. En phase de fonctionnement les bruits principaux seront liés aux systèmes de ventilation, aux transformateurs électriques et à la centrale à béton utilisée pour la poursuite du creusement des alvéoles. La circulation des engins est également susceptible de produire des vibrations. Enfin, l'alimentation électrique à haute tension engendrera des champs électriques et magnétiques de très basse fréquence.

Plusieurs mesures d'évitement et de réduction sont prévues, outre l'éloignement du site à 500 m des habitations les plus proches, l'installation de merlons et d'écrans acoustiques en zone descenderie, l'utilisation d'un convoyeur semi enterré, le blindage des liaisons électriques enterrées, l'éclairage focalisé à la demande et la réalisation des travaux uniquement en période diurne de 7h à 22h.

Les niveaux sonores maximaux calculés par modélisation sont les plus élevés au droit de l'hôtel de Bindeuil, des habitations de Saudron et de Gillaumé. Pour ces trois sites, les émergences réglementaires sont dépassées en période diurne (Saudron 6,6 dB, Gillaumé 8,2 dB) et pour l'hôtel de Bindeuil (10 dB) en période nocturne. La mise en place d'un merlon acoustique, proposée comme mesure de réduction, devrait permettre de réduire les émergences au niveau requis par la réglementation. L'étude des risques sanitaires souligne que ces niveaux « *peuvent représenter une gêne et éventuellement un peu de stress pour les résidents* » mais qu'« *ils ne perturberont pas leur sommeil* ». L'Ae considère ce constat insuffisant ; les niveaux de bruit résiduels devraient respecter les préconisations de l'Organisation mondiale de la santé.

Les champs électriques et magnétiques liés à la ligne électrique aérienne à 400 kV sont largement inférieurs aux valeurs limites réglementaires respectivement de 5 000 V/m et 100 µT. Cependant, au droit de la ligne, le champ électrique atteint 4 950 V/m. Il en est de même pour la liaison électrique souterraine à 90 kV.

2.3.2.2.2 Nuisances chimiques

Les émissions de substances toxiques en milieu liquide comprennent des substances minérales contenues dans les verses, dont la composition n'est pas précisée (cf. § 2.1.1.4), des hydrocarbures du fait de la présence d'engins, des matières en suspension, de l'azote, du phosphore, du cuivre, du zinc, du plomb, du cadmium, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des sulfates. Les émissions de substances en phase gazeuse sont, pour le chantier, des poussières, oxydes d'azote, oxydes de soufre, monoxyde de carbone et hydrocarbures dont des composés organiques volatils. En phase d'exploitation, les poussières emportées par érosion éolienne des verses, les gaz émis par les véhicules et diverses substances émises par les installations.

Les mesures de réduction concernent le traitement des eaux, qui est spécifique à chaque installation, leur contrôle avant rejet, la végétalisation des verses et diverses mesures de chantier comme la limitation de vitesse et l'arrosage des pistes. Ces mesures conduisent le maître d'ouvrage à considérer que le risque sanitaire lié aux rejets en milieu liquide n'est pas significatif. Cette conclusion est acceptable sous réserve de prise en compte de la recommandation de l'Ae concernant la composition chimique des verses émise au chapitre 2.1.1.3.

L'évaluation des risques sanitaires liés au milieu aérien porte sur les substances suivantes : oxydes d'azote, oxydes de soufre, PM_{10} et $PM_{2,5}$, composés organiques volatils et monoxyde de carbone. Les populations prises en compte sont celles des villages les plus proches. Les quotients de dangers et les excès de risque individuels sont tous très inférieurs aux valeurs repère de risque utilisées en évaluation de risque sanitaire[62]. Pour les substances pour lesquelles on ne dispose pas de valeurs toxiques de référence mais seulement d'objectifs de qualité, ceux-ci sont largement respectés.

2.3.2.2.3 Radioactivité

L'exposition radioactive naturelle annuelle des personnes en France est en moyenne de 2,9 millisievert (mSv). La réglementation limite à un total de 1 mSv l'exposition annuelle aux rayonnements ionisants liée aux activités nucléaires dans l'environnement, toutes sources confondues. La limite fixée pour les émissions spécifiques à Cigéo est de 0,25 mSv, cette limite étant supposée pérenne pour les générations futures.

Les émissions liées au transports des colis de déchets radioactifs sont jugées très faibles, elles concernent environ 76 trains par an en phase de fonctionnement. Les colis sont conditionnés de façon à ce que les surfaces accessibles ne contiennent pas plus de 4 Bq/m², et le rayonnement ne peut dépasser 2 mSv/h, limité à 0,1 mSv/h à 2 m de l'emballage. Une fois sur place, les émissions des colis, qui ne seront pas ouverts, sont liées à leur manutention. Il s'agit d'éventuelles contaminations de surface et d'émissions gazeuses des déchets MA-VL (3H, 14C, 85Kr). Les émissions sont présentées dans le chapitre 2.3.1.2 du présent avis. Le dossier mentionne également la présence, en très faible quantité, de déchets liés à « la récupération d'effluents des zones à production possible de déchets nucléaires », Il s'agit d'effluents liquides internes de 150 l/jour avec une contamination de l'ordre de quelques dizaines de Bq/l.

La conception des colis qui conduit aux normes de contamination et d'émission indiquées supra constitue une première mesure de réduction. Le système de ventilation du site avec des filtres à très haute efficacité constituent la deuxième de ces mesures. La hauteur des cheminées, 40 m en zone descenderie, forme la troisième.

Les risques sanitaires sont évalués à partir des concentrations dispersées dans l'air ambiant au niveau des zones d'habitation et du dépôt sur les denrées alimentaires susceptibles d'être ingérées par les habitants. L'exposition résultante est de l'ordre de 1 µSv/an, soit mille fois moins que la norme réglementaire.

2.3.2.3 Paysage

La construction du centre Cigéo comporte des modifications du relief, des défrichements, la construction de bâtiments et la mise en place d'infrastructures linéaires qui modifient significativement le paysage forestier et agricole qui caractérise le site aujourd'hui. Les mesures d'évitement comportent, outre le choix d'un site rural, le maintien de bandes boisées en bordure des sites, la réutilisation d'infrastructures existantes et la préservation des milieux ouverts au niveau de la descenderie. La réduction des impacts paysagers s'appuie sur le modelé des verses végétalisées et des différents espaces, conforme au terrain naturel, l'éloignement de la liaison intersites de Mandres-en-Barrois et de Bure et la plantation de masques boisés.

[62] Le quotient de danger est le rapport de la dose d'exposition sur le seuil d'effet, l'excès de risque individuel est la probabilité de cancer du fait de l'exposition aux systèmes toxiques.

Le dossier est abondamment illustré avec des photomontages qui illustrent les modifications du paysage entre l'état actuel, la phase d'aménagements préalables et la phase de fonctionnement. Les photographies servant de support à ces photomontages semblent prises du même point de vue mais n'ont pas toutes le même angle de champ, ce qui rend difficiles certaines comparaisons.

2.4 Évaluation des incidences Natura 2000

Les sites Natura 2000 ont été recensés dans un rayon de 30 km autour du site de Cigéo (cf. carte figure 13) et à proximité de la ligne à 400 kV. Aucun site n'est directement recouvert par l'emprise du projet à l'exception de la voie ferrée et des pylônes de la ligne à 400 kV. La *ZPS FR2112001* « Herbages et cultures des vallées de la Voire, de l'Héronne et de la Laines » qui jouxte la réserve naturelle des étangs de la Horre et qui est située à 350 m au sud de la ligne à 400 kV sur la commune de Rives-Dervoises, n'est pas mentionnée.

L'Ae recommande de compléter l'analyse des enjeux des sites Natura 2000 en ajoutant la ZPS FR2112001 « Herbages et cultures des vallées de la Voire, de l'Héronne et de la Laines ».

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R33

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments de réponse suivants.

Cette modification, qui intègre par ailleurs les remarques de la recommandation R34, ne remet pas en cause l'analyse de l'absence d'incidence significative du projet global Cigéo sur les sites Natura 2000 qui figure au chapitre 5 du volume V de l'EI.

Trois pylônes de la ligne 400 kV sont effectivement situés entre 350 et 500 mètres de la limite de la ZPS « *Herbages et cultures des vallées de la Voire, de l'Héronne et de la Laines* » comme illustré à la Figure 2-38.

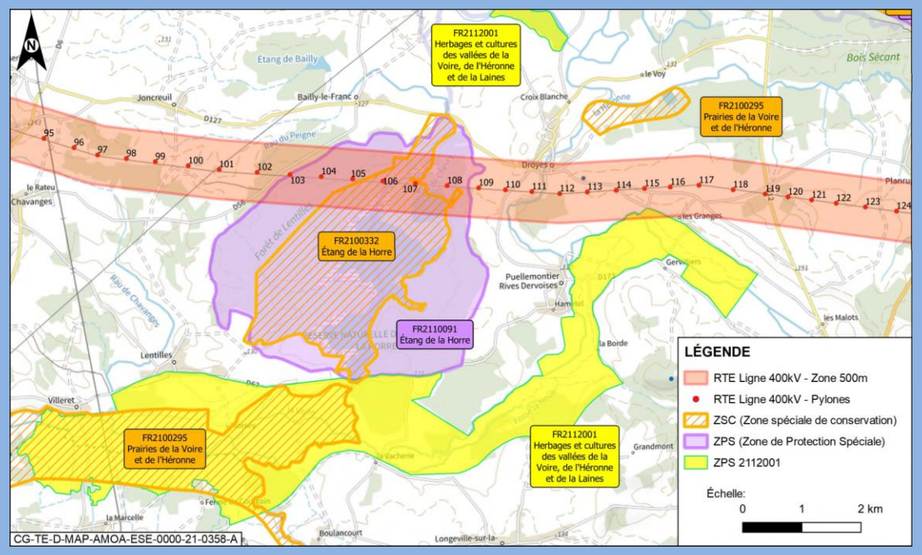


Figure 2-38 Localisation de la ZPS FR2112001 par rapport à la ligne électrique 400 kV

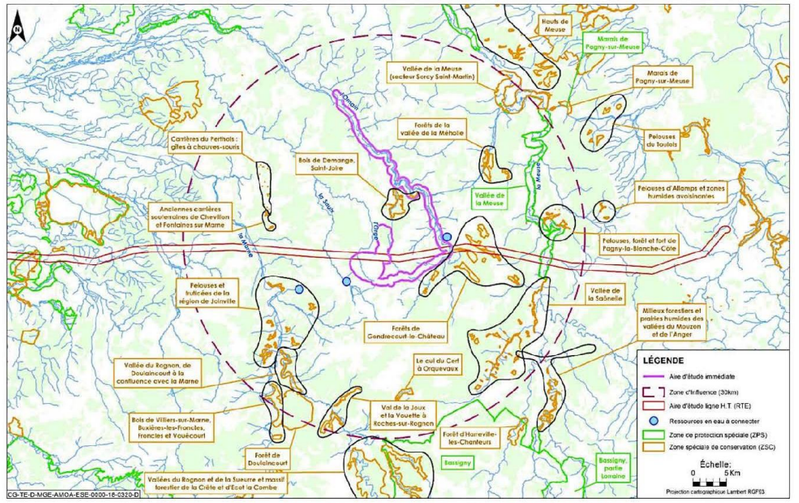


Figure 13 : Sites pris en compte par l'évaluation des incidences Natura 2000. Source dossier.

Le dossier liste les types d'effets génériques sur les espèces et habitats naturels de sites Natura 2000 :

- Destruction des habitats naturels et habitats d'espèces ;
- Destruction des individus ;
- Altération biochimique des milieux ;
- Perturbation et dérangement ;
- Effet de lisière (coupe rase, aménagement en bordure de site) ;
- Dégradation des fonctionnalités écologiques.

Les mesures d'évitement et de réduction sont précisées : cinq mesures d'évitement et 15 mesures de réduction. L'analyse du dossier conduit à exclure l'existence d'incidences négatives significatives sur les habitats naturels et espèces ayant permis de désigner les sites Natura 2000 après mesures d'évitement et de réduction. Les incidences du renforcement de la ligne électrique à 400 kV sur les oiseaux notamment au niveau des pylônes situés dans les ZSC FR 2110091, FR 2100332 et FR 2112001 ne peuvent faire l'objet d'une conclusion certaine, les travaux sur ces ouvrages n'étant pas décrits avec suffisamment de précision pour juger de l'absence d'incidence significative. De même, les deux espèces Agrion de Mercure et Chabot qui ont permis la désignation de la ZSC FR 4100180 pourraient être affectées par les modifications du régime hydrologique et de la qualité des eaux de ruissellement car leurs habitats, s'ils ne font pas l'objet de changement physique direct, sont situés dans le bassin versant du bois Lejuc où des défrichements de grande ampleur auront lieu et qui accueillera les verses. Ces éléments conduisent l'Ae à ne pas souscrire, à ce stade des études, aux conclusions sur l'absence d'incidence significative sur les sites Natura 2000.

L'Ae recommande de préciser la nature des travaux qui seront réalisés sur la ligne électrique à 400 kV au droit des zones de protection spéciale du réseau Natura 2000 et de mettre en place le cas échéant des mesures d'évitement et de réduction supplémentaires afin de garantir l'absence d'incidences sur les oiseaux ayant permis la désignation de ces sites.

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R34

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec les éléments suivants qui confirment l'absence d'incidence significative du projet global Cigéo sur les sites Natura 2000.

Pour rappel, les tempêtes de l'hiver 1999-2000 ont conduit RTE à lancer un programme de sécurisation mécanique de son réseau. L'objectif est d'éviter les coupures d'alimentation occasionnées par des événements climatiques exceptionnels en renforçant les infrastructures pour une meilleure résistance au vent. Chaque poste électrique doit ainsi être raccordé *a minima* par une ligne sécurisée mécaniquement. Pour le poste de transformation destiné à alimenter le centre de stockage Cigéo, raccordé sur la ligne à 400 000 volts Houdreville – Méry, le choix de sécurisation s'est porté sur le tronçon de la ligne existante à l'est vers Houdreville, plus court que le tronçon ouest vers Méry.

Afin de prendre en compte cette recommandation de l'Autorité environnementale, le volume V de l'étude d'impact relatifs à l'évaluation du projet sur les sites Natura 2000 a été adapté afin d'y intégrer les compléments suivants :

- des précisions ont été apportées par RTE sur la nature des travaux, telle que décrite au chapitre 2.3.1 du volume V, au niveau de chaque pylône situé sur ou à proximité immédiate des sites classés Natura 2000. Ainsi, les pylônes situés dans les sites classés de l'étang de la Horre ne feront pas l'objet de travaux lourds de renforcement et aucune plateforme provisoire nécessaire au remplacement du câble de garde ne sera installée. Les détails de ces travaux sont précisés dans le tableau 2-7 pour tous les sites Natura 2000 traversés ;
- des observations naturalistes réalisées en 2019 par un bureau d'étude écologue sur les pylônes de la ligne 400 kV situés en zone Natura 2000 viennent compléter l'évaluation des incidences du projet de sécurisation de la ligne. Ces données sont présentées de manière synthétique au chapitre 6.11.3 du volume IV et dans l'analyse des incidences sur les sites Natura 2000 au regard des opérations envisagées sur chaque pylône ;
- sur les opérations nécessitant la création de pistes d'accès provisoires pour les engins lourds, un écologue a été mandaté par RTE afin d'évaluer les incidences de ces opérations sur le milieu naturel et de proposer des mesures d'évitement et de réduction pertinentes. Les résultats de cette expertise sont ajoutés au volume V de l'étude d'impact pour les deux sites concernés (Forêt de Gondrecourt et Vallée de la Meuse) ;
- des précisions sont également apportées sur les incidences du projet de centre de stockage Cigéo sur la ZSC « bois de Demange, Saint-Joire » située à l'aval hydraulique de la zone puits. Ce complément fait écho à la remarque R33 de l'Autorité Environnementale relatif aux potentiels impacts du projet sur les deux espèces d'intérêt communautaire présentes ce site à savoir l'Agrion de mercure et le Chabot commun.

Toutes les modifications apportées au dossier sont clairement identifiées dans le volume V de l'étude d'impact mais aussi dans les différents volumes de l'étude d'impact en lien avec les évaluations des incidences sur les sites Natura 2000.

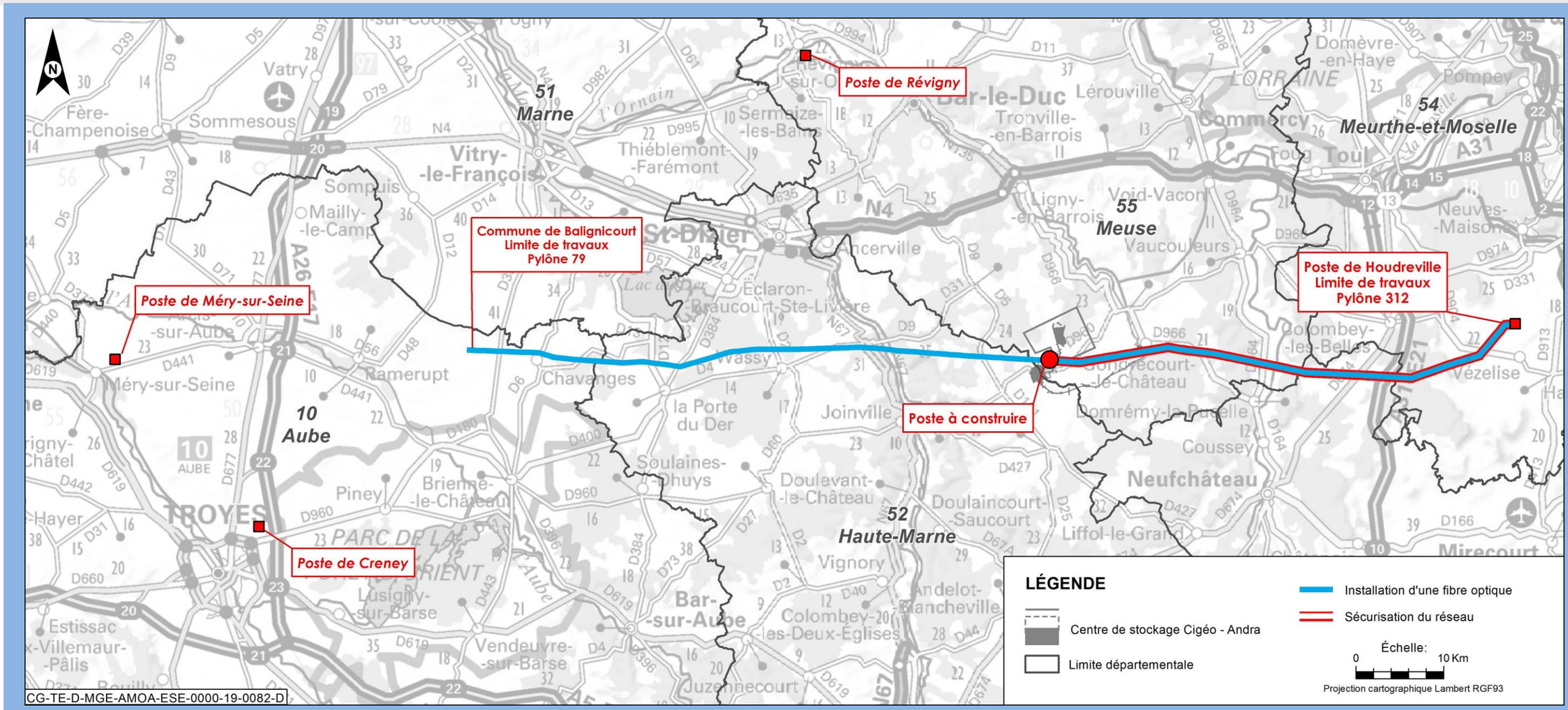


Figure 2-39 Plan de localisation de la portion de la ligne 400 kV faisant l'objet de travaux de sécurisation

Tableau 2-7 Nature des travaux envisagés au niveau des pylônes de la ligne 400 kV situés sur ou à proximité immédiate des sites Natura 2000

Sites N2000 concernés	n° pylônes	Travaux de création de pistes provisoires	Travaux de renforcement des STRUCTURES	Travaux de renforcement des FONDATIONS	Remplacement à l'identique de support	Remplacement du câble de garde	Plateformes provisoires de déroulage du câble de garde
Étang de la Horre **FR2110091 (ZPS)** **FR2100332 (ZSC)** **RNN**	Pylônes 103 à 108	-	-	-	-	✓	-
Herbages et cultures des vallées de la Voire **FR2112001 (ZPS)**	Pylônes 114 à 116 situés entre 350 et 500 m de la ligne	-	-	-	-	✓	-
Forêts de Gondrecourt **FR4100182 (ZSC)**	Pylône 232	✓	✓	✓	-	✓	-
	Pylône 233	✓	✓	-	-	✓	
	Pylônes 239 à 243	-	-	-	-	✓	
Vallée de la Meuse **FR4112008 (ZPS)**	Pylônes 257, 258 et 259	✓	✓	✓	-	✓	-

RNN : Réserve naturelle nationale ; ZPS : Zone de protection spéciale ; ZSC : Zones spéciale de conservation

2.5 Évaluation économique et sociale des infrastructures de transport

Le dossier comprend la réalisation de deux infrastructures de transport, ferroviaire et routière. Il comporte une évaluation économique et sociale de ces infrastructures dans un cahier séparé. Il souligne que l'enjeu économique est fort du fait d'une faible densité de population, d'une faible attractivité économique, d'un solde migratoire déficitaire, d'un nombre important de logements vacants et d'un taux de chômage légèrement supérieur à la moyenne nationale.

Toutes les infrastructures de transport sont listées dans le dossier avec le trafic qui les emprunte. Le cadrage économique est fondé sur les données de l'Institut national de la statistique et des études économiques et des études économiques et du Conseil d'orientation des retraites, soit une augmentation du produit intérieur brut de 1,5 % par an et une croissance démographique de 0,3 % par an. Les hypothèses d'évolution du trafic, du prix des carburants et de la consommation d'énergie sont celles des deux scénarios AME et AMS[63] de la Stratégie nationale bas carbone. Le coût du pétrole est estimé selon les projections de l'Agence internationale de l'énergie.

L'étude souligne l'effet positif de Cigéo sur l'économie du territoire. Les emplois devraient augmenter pendant la phase préalable jusqu'à 2000 personnes en phase de construction initiale. En fonctionnement, 370 emplois sont prévus à l'Andra avec un effet induit de 600 emplois chez les fournisseurs, prestataires et sous-traitants.

Le projet comporte la création ou la modification de plusieurs voies de communication : ligne ferroviaire, installation terminale embranchée, déviation de la départementale 60/960 et liaison intersites. L'effet de ces infrastructures sur les déplacements est évalué en temps et en distance en comparaison d'une situation où les voiries routières existantes seraient utilisées. Le projet permettra ainsi de diminuer les trajets annuels de 57 000 km en voiture et 250 000 km en poids-lourd ainsi que 15 000 km en convoi exceptionnel. En revanche, les distances parcourues par les trains de fret

[63] AME scénario « avec mesures existantes » (tendanciel), AMS scénario avec mesures spéciales supplémentaires (volontariste).

augmenteraient de 3 500 km/an. L'Ae observe que le scénario de référence ne saurait être le projet Cigéo sans infrastructures mais l'absence de projet Cigéo. Il convient de reprendre cette analyse dans ce sens.

L'Ae recommande de corriger l'évaluation socio-économique en considérant comme référence que le projet Cigéo ne se fait pas.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R35

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte les éléments de justification de la démarche retenue pour l'évaluation économique et sociale qui a été confirmée par l'avis favorable du SGPI.

L'évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo compare l'option de projet (constitué des aménagements suivants : infrastructures routières de création d'une liaison intersites et de déviation de la route départementale D60/960 ; infrastructures ferroviaires de renforcement de la ligne 027000 et de création de l'Installation terminale embranchée) à une option de référence constituée du centre de stockage Cigéo sans ses infrastructures. Rappelons que selon les prescriptions méthodologiques pour l'évaluation des projets de transport, l'option de référence correspond par définition aux infrastructures les plus probables que réaliserait le maître d'ouvrage du projet évalué, dans le cas où le projet d'infrastructure de transport considéré ne serait pas réalisé. De fait, en l'absence de toute infrastructure de transport nouvelle, l'option de référence retenue pour la desserte du site se ferait via une mise à niveau de voies routières existantes et le transport serait de type exclusivement routier.

La recommandation de l'Ae qui suggère de retenir en option de référence l'absence stricte de projet de centre de stockage Cigéo ne répond pas aux prescriptions méthodologiques de l'instruction du gouvernement du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport.

Elle comporte en outre les conséquences affectant l'objectif propre de l'évaluation économique et sociale comme le précise le tableau 2-8 ci-après :

Tableau 2-8 Comparaison des méthodologies de l'évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo et suggérée par l'Ae

Option et méthodologie	Méthodologie de l'évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo	Méthodologie recommandée par l'Ae
Option de projet	Les quatre infrastructures de transport du projet global Cigéo (infrastructures routières et ferroviaires)	
Option de référence	Mise à niveau des voies routières existantes pour une desserte et un transport exclusivement routier	Absence de projet de centre de stockage Cigéo (et de toute infrastructure de transport associée)
Incidence évaluée ***(option de projet – option de référence)***	**Incidence des infrastructures de transport du projet global Cigéo** **Permet de comparer des scénarios différents d'infrastructure de transport du projet**	**Incidence du projet Cigéo** **Ne permet pas de comparer des scénarios de transport du projet**

Ainsi dans l'évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo, ce sont les infrastructures de transport qui sont évaluées, tandis que la méthodologie suggérée par l'Ae porte de fait sur une évaluation d'opportunité des infrastructures même si le projet global Cigéo ne se faisait pas. Or, en l'absence de réalisation du centre de stockage Cigéo, aucune des infrastructures de transport du projet global Cigéo ne serait réalisée. D'ailleurs, aucune de ces infrastructures ne présente en elle-même un intérêt en lien direct avec le territoire, qui pourrait justifier leur mise en œuvre en l'absence du projet : la déviation de la route départementale D60/960 est nécessaire du fait de l'emprise de la zone descenderie sur le tracé actuel de cette route ; la liaison intersites est nécessaire pour relier les zones descenderie et puits entre elles ; l'installation terminale embranchée comme la mise à niveau de la ligne 027000 sont nécessaires pour établir la desserte ferroviaire du centre de stockage.

Cet objectif d'évaluation est précisé par l'Andra dans la pièce 13 du dossier de DUP, soumis à instruction, chapitre 1.1, page 6 (49) : « *La présente évaluation économique et sociale vise à apprécier l'intérêt pour la collectivité de la réalisation des infrastructures de transport du projet global Cigéo et à éclairer le public sur le choix des infrastructures proposées.* ».

Et la justification du choix de l'option de référence est présentée par l'Andra dans le chapitre 1.3.1, page 13 : « La réalisation de ces différentes infrastructures de transport est totalement conditionnée par celle du centre de stockage Cigéo au fonctionnement duquel elles contribuent. En effet, leur double objectif se situe à l'interface entre le projet global Cigéo et les différents réseaux de transport présents sur le territoire, et vise d'une part à assurer la desserte du centre de stockage Cigéo et d'autre part à

maintenir la continuité des réseaux locaux impactés par le projet global Cigéo. Ainsi, la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et la création d'une installation terminale embranchée dans son prolongement permettent d'assurer la desserte ferroviaire directe du centre de stockage Cigéo depuis le réseau ferré national. La création d'une liaison intersites permet d'assurer une desserte interne entre les deux zones d'implantation de surface du centre de stockage Cigéo, dites zone puits et zone descenderie. Et enfin, la déviation de la route départementale D60/960 permet d'assurer le rétablissement de cette route, dont le tracé se situe au droit de la zone descenderie.

Dans ces conditions, en elles-mêmes, que ce soit individuellement ou de manière groupée pour tout ou partie, ces infrastructures ne constituent pas un ensemble cohérent et de nature à être mis en service en l'absence de la réalisation du centre de stockage Cigéo. »

Ainsi, l'évaluation économique et sociale est faite conditionnellement à la réalisation du centre de stockage Cigéo, i.e. l'option de référence considère d'autres solutions permettant la desserte, le développement et le fonctionnement du site, certes de façon non optimale.

Enfin, l'évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo a bénéficié d'un avis favorable 2021 n° 71 du Secrétariat général pour l'investissement (50) qui a diligenté une contre-expertise indépendante. Selon cet avis (cf. Page 3): « *L'évaluation socio-économique du projet dans son ensemble est de qualité, transparente et respecte le cadre méthodologique imparti à ce type d'approches. (…) Celle du volet transport est pour l'essentiel en ligne avec la directive transport et ses mises à jour. Elle est faite sous l'hypothèse de réalisation du site de Bure et vise à optimiser les choix en matière d'accès et de transport local.* » Selon le rapport au Secrétaire général pour l'investissement *« Contre-expertise de l'évaluation socioéconomique du projet de Cigéo »* en date du 5 février 2021 (cf. Page 28) (51): « *Comme l'ESE du volet transport a comme objectif principal de démontrer que les infrastructures de transport proposées dans le cadre du projet global Cigéo sont la solution qui optimisent les coûts économiques, environnementaux et sociaux en comparaison à d'autres alternatives possibles, l'ESE se place dans le cas de la mise en œuvre du projet global Cigéo et donc en supposant que les déchets sont acheminés par train des centres d'entreposage temporaire jusqu'à proximité de la zone du projet sur la ligne ferroviaire Paris-Strasbourg (RFN 070000)*[13]*, ce qui est correct d'un point de vue méthodologique.* »

Compte tenu de l'avis favorable du SGPI, la méthodologie développée dans la pièce 13 est confirmée.

« L'Ae observe que ce calcul, fondé sur les gains de temps et de distance sur les infrastructures et le report modal vers la voie ferrée ne prend pas en compte les effets induits sur le territoire qui devraient se traduire par des déplacements supplémentaires, les déplacements entre le siège ou les autres sites de l'Andra et le site ne sont pas non plus pris en compte. ».

Les coûts collectifs associés aux déplacements supplémentaires résultant de la réalisation du centre de stockage Cigéo (construction puis fonctionnement) ont été évaluées[14]. Les valeurs correspondantes sont présentées dans l'étude d'impact (Pièce 6), au chapitre 12.10.2 du volume IV ; ce sont les données des colonnes intitulées « Projet global Cigéo avec le programme d'infrastructures de transport retenu » et « Projet global Cigéo avec aménagements des infrastructures de transport existantes » reproduites dans le tableau 12.10-1 ci-après.

12.10.2.1 **Résultats des calculs de base**

Le tableau ci-dessous présente les résultats des calculs de base pour les trois évaluations des coûts collectifs mentionnées ci-avant : (1), (2) et (3) = (1) - (2) (cf. le chapitre 12.9.1 du présent document).

Tableau 12.10-1 Coûts collectifs liés aux déplacements résultant de la construction et du fonctionnement du projet global Cigéo, pour le scénario AMS – en millions d'euros de 2018 actualisés en 2019 ($M€_{2016}$) et en %

Poste	Projet global Cigéo avec le programme d'infrastructures de transport retenu $M€_{2016}$	Projet global Cigéo avec aménagements des infrastructures de transport existantes $M€_{2016}$	Impact du programme d'infrastructures de transport retenu (1)-(2) $M€_{2016}$	Impact du programme d'infrastructures de transport retenu [(1)-(2)]/(2) %
Pollution atmosphérique	-3,2	-3,2	+0,0	-1 %
Émissions de GES (CO2)	-7,8	-9,5	+1,7	-18 %
Bruit des transports	-0,4	-0,4	+0,0	-5 %
Sécurité des transports	-13,3	-13,8	+0,5	-4 %
Congestion routière	-7,9	-8,0	+0,1	-1 %
Total des coûts collectifs	-32,6	-34,9	+2,3	-7 %

Il s'agit là d'une évaluation différentielle, dont la définition est donnée en section 12.9.1 du même rapport à propos des calculs relatifs aux consommations énergétiques :

- une première évaluation est établie par différence entre une situation dans laquelle le projet global Cigéo est réalisé, avec le programme d'infrastructures de transport retenu pour accompagner le centre de stockage Cigéo (cf. la description de ce programme dans le volume II du présent document), et la situation dans laquelle le projet global Cigéo n'est pas réalisé ;
- une seconde évaluation est établie par différence entre une situation dans laquelle le projet global Cigéo est réalisé, mais dans laquelle on limite les aménagements à réaliser en réutilisant autant que faire se peut les infrastructures de transport existantes, et la situation dans laquelle le projet global Cigéo n'est pas réalisé ;

Les déplacements supplémentaires résultant de la réalisation du centre de stockage Cigéo sont pris en compte dans les calculs socio-économiques présentés dans la pièce 13, tant pour la phase de construction que pour sa phase de fonctionnement jusqu'en 2170. Cependant, le nombre de personnes et le nombre de tonnes de marchandises se déplaçant sont identiques dans l'option de référence et dans l'option de projet ; c'est-à-dire que la réalisation des quatre infrastructures évaluées ne génère pas de déplacements supplémentaires (trafic induit).

[13] Sorcy-Saint-Martin (option de référence) ou Nançois sur Ornain (option de projet)

[14] Y compris le cas des déplacements supplémentaires entre le siège ou les autres sites de l'Andra et le site du centre de stockage Cigéo.

Le calcul, en valeur de 2018, des avantages collectifs monétarisés a été effectué en utilisant les valeurs tutélaires des fiches outils du référentiel d'évaluation des coûts de transport de 2019. Le taux d'actualisation est celui préconisé par la direction générale des infrastructures de transport, soit 4 %. Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 3. L'essentiel des bénéfices se traduit par un moindre coût d'usage des véhicules. Le bilan global des infrastructures de transport du projet se traduit par une valeur actualisée nette de 36,8 millions d'euros. Les tests de sensibilité donnent une fourchette entre 30 et 42 millions d'euros pour cette valeur.

L'Ae observe que ce calcul, fondé sur les gains de temps et de distance sur les infrastructures et le report modal vers la voie ferrée ne prend pas en compte les effets induits sur le territoire qui devraient se traduire par des déplacements supplémentaires, les déplacements entre le siège ou les autres sites de l'Andra et le site ne sont pas non plus pris en compte.

Nature du coût ou de l'avantage	Valeur actualisée en millions d'€ de 2018
Investissement	-123,7
Entretien, exploitation et renouvellement	-20
Gain de temps des usagers de la route	8,1
Coût d'usage des véhicules routiers	171
Cout de transport ferroviaire	-1,7
Sécurité des transports	0,5
Congestion routière	0,1
Bruit des transports	0,02
Pollution atmosphérique	0,04
Émission de gaz à effet de serre	1,7
Coût d'opportunité des fonds publics	0,7
Valeur actualisée nette socio-économique	**36,8**

Tableau 3 : Valeur des coûts et avantages permettant le calcul de la valeur actualisée nette socio-économique. Source dossier.

2.6 Suivi du projet, de ses incidences, des mesures et de leurs effets

Le dossier ne comporte pas de document regroupant l'ensemble des mesures de suivi. Certaines d'entre elles sont cependant présentées en regard des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation. Le résumé non technique indique qu'un plan de surveillance sera mis en place afin de vérifier l'efficacité des mesures sur plusieurs compartiments de l'environnement. Cette surveillance sera assurée par un service compétent sous la surveillance d'une commission locale d'information.

L'Ae recommande de fournir un récapitulatif de l'ensemble des mesures de suivi du projet.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R36

L'Andra prend acte de cette recommandation et a mis à jour le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo avec un récapitulatif de l'ensemble des mesures d'évitement, de réduction et de compensation qui a été ajouté au chapitre 19 du volume IV de la pièce 6 du présent dossier d'enquête publique préalable la déclaration d'utilité publique du projet global Cigéo. Chaque mesure est accompagnée de ses modalités de suivi.

Les modalités du suivi, pour l'ensemble des installations quel que soit leur maître d'ouvrage, ont pour objectif de vérifier le degré d'efficacité et la pérennité des prescriptions, mesures et caractéristiques du projet destinées à éviter, réduire et compenser les effets négatifs notables de celui-ci sur l'environnement et la santé humaine. Ces modalités de suivi sont proportionnées à la nature et aux dimensions des différentes opérations constituant le projet global Cigéo, à l'importance de leurs incidences prévues sur l'environnement ou la santé humaine, ainsi qu'à la sensibilité des milieux concernés. Ces modalités de suivi qui seront reprises dans les différentes autorisations administratives, permettent aussi de vérifier le respect des exigences réglementaires en matière de protection de l'environnement. Enfin, elles ont pour objectif de détecter le plus précocement possible toute situation anormale pour assurer de l'absence de dysfonctionnement de qui pourrait impacter l'environnement.

Les principes proposés pour la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo seront détaillés progressivement au fur et à mesures des actualisations de l'étude d'impact du projet global Cigéo. Ainsi, pour les autorisations environnementales seront décrites toutes les dispositions mises en œuvre par les maitres d'ouvrage pour garantir le suivi et la réussite des mesures ERC. Elles détailleront notamment la localisation des points de suivi, leur fréquence, les type d'instrumentation, les seuils à respecter, les qualifications des personnes en charge de leur réalisation, les alternatives à étudier en cas d'échec.

Grâce à ces modalités de suivi, l'Andra garantit le respect des engagements environnementaux pris au fur et à mesure des actualisations de l'étude d'impact du projet global Cigéo.

2.7 Résumé non technique

Le résumé non technique de 148 pages est à l'image du reste du dossier : il est didactique et abondamment illustré. Il reprend pour chacun des enjeux la description de l'état actuel, des incidences et des mesures d'évitement, de réduction et de compensation. Il n'aborde cependant pas le choix opéré parmi les solutions de substitution, ce qui est indispensable pour informer complètement le public.

L'Ae recommande de prendre en compte dans le résumé non technique les conséquences des recommandations du présent avis et d'inclure des éléments sur le choix opéré parmi les diverses options.

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R37

Le résumé non technique de l'étude d'impact du projet global Cigéo, pièce 6bis du dossier de demande préalable d'enquête publique pour la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, **a été mis à jour selon les éléments de réponse fournis par l'Andra dans le présent mémoire en réponse à l'avis de l'Ae.**

3 Maîtrise des risques majeurs

3.1 Traitement de l'évaluation et de la maîtrise des risques dans le dossier de DUP

Le dossier de déclaration d'utilité publique de Cigéo n'inclut pas spécifiquement de rapport de sécurité (ou étude de dangers, ou de sûreté au sens du code de l'environnement). Il fait cependant référence au dossier d'options de sûreté (DOS[64]) remis en 2016, dont il rappelle les conclusions, ainsi qu'aux différents avis produits sur ce DOS, dont celui de l'ASN de 2018[65].

Le dossier de DUP ne présente pas les analyses de risque qui ont conduit à leur identification et à leur prévention.

Le code de l'environnement n'exige pas la production d'une étude de danger ou de sûreté en tant que telle pour la procédure de déclaration d'utilité publique[66]. L'article R. 122-5 6° du code de l'environnement indique cependant que l'étude d'impact comporte *« une description des incidences négatives notables attendues du projet sur l'environnement qui résultent de la vulnérabilité du projet à des risques d'accidents ou de catastrophes majeurs en rapport avec le projet concerné. Cette description comprend le cas échéant les mesures envisagées pour éviter ou réduire les incidences négatives notables de ces événements sur l'environnement et le détail de la préparation et de la réponse envisagée à ces situations d'urgence »*. Le dossier ne comporte aucun volet dédié à cette prescription.

Pour l'Ae, la sûreté et la sécurité à court, moyen et long termes de ce projet sont des facteurs déterminants de son utilité publique : l'élément principalement redouté est l'accident ou l'erreur de conception du fait d'une appréciation initiale insuffisante du risque qui pourrait générer des impacts bien supérieurs aux impacts observés selon le fonctionnement « normal » projeté. L'Ae considère donc que les aspects de prévention des risques majeurs auraient mérité non seulement une synthèse des conclusions d'études précédentes, mais la présentation de la démarche d'analyse des risques qui a conduit à ces conclusions, et si possible dans un volet dédié. Sans la démarche d'analyse de risques, il est difficile de juger de la qualité et de la complétude de leur prise en compte dans le dossier et de leur maîtrise par le projet. Il est compréhensible que cette analyse ne soit pas complète pour une procédure qui intervient en amont de l'autorisation de création de l'installation, mais l'étude d'impact ne peut pas faire abstraction des éléments structurants et déterminants de cette analyse, nécessaires à l'appréciation du bilan des avantages et des incidences négatives notables, y compris potentielles, du projet.

[64] andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference#section-3144

[65] asn.fr/Informer/Actualites/Avis-de-l-ASN-sur-les-options-de-surete-de-Cigeo

[66] Article R. 122-7 : *« L'autorité compétente pour prendre la décision d'autorisation du projet transmet pour avis le dossier comprenant l'étude d'impact et le dossier de demande d'autorisation* [la demande de déclaration d'utilité publique dans le cas d'espèce] *aux autorités mentionnées au V de l'article L. 122-1 ».*

Le dossier devrait également préciser le niveau d'impact de tels accidents à l'extérieur du site, voire à longue distance, comme ce pourrait être le cas avec une pollution des eaux dans la situation de Cigéo, en tête de bassin versant.

L'Ae recommande de produire, dès cette première version de l'étude d'impact, une première analyse des risques accidentels liés au projet, en particulier des éléments structurants et déterminants du rapport préliminaire de sûreté et d'une description des incidences négatives notables du projet à court, moyen et long termes, qui résultent de la vulnérabilité du projet à des risques d'accidents ou de catastrophes majeurs. Une évaluation des impacts directs ou indirects de tels accidents et le cas échéant, leur cartographie pour différents scénarios devraient être présentées dans le dossier de DUP.

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R38

L'Andra prend acte de cette recommandation et l'étude d'impact du présent dossier d'enquête publique préalable à la DUP fait référence aux analyses de risques liés à la présence de substances radioactives présentées dans les options de sureté en exploitation et après fermeture soumis à l'Autorité de sûreté en 2016, et disponibles sur le site de l'Andra à l'adresse suivante : www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference.

Pour rappeler les éléments structurants de ces options de sureté, une synthèse des options de sûreté (cf. Chapitre 1.3.1.2) est jointe en annexe 1 du présent mémoire et les éléments relatifs à l'évaluation de l'apport des accidents sont représentés dans la réponse à la recommandation R19.

Elle synthétise la démarche globale de sûreté retenue, les méthodologies d'analyse des risques en exploitation et après fermeture ainsi que les incidences radiologiques des scénarios évalués dans le dossier d'options de sûreté de 2016.

Par ailleurs, la réponse à la recommandation R19 précise d'une part les hypothèses associées à ces évaluations d'incidence et d'autre part les éléments complémentaires sur les incidences non radiologiques, et explicite les résultats des évaluations des incidences environnementales et sanitaires des accidents les plus sévères ainsi que la localisation du maximum de ces incidences.

Le futur dossier en support à la demande de l'autorisation de création de l'INB du centre de stockage Cigéo, comprendra plusieurs pièces (cf. Article 593-16 du code de l'environnement). Parmi ces pièces, les éléments déterminants de la version préliminaire du rapport de sûreté seront présentés dans l'étude de maîtrise des risques jointe au dossier d'enquête publique de la demande d'autorisation de création). Ils reprendront les éléments des options de sûreté en les complétant notamment par les apports de la connaissance acquise depuis, les études d'avant-projet et les études de sûreté et sécurité associées, ainsi que par les réponses aux demandes de l'Autorité de sûreté nucléaire qu'elle a formulée dans sa lettre CODEP-DRC-2018-001635 de suite de l'instruction des options de sûreté le 12 janvier 2018 (52). Dans le cadre du dossier d'autorisation de création, conformément au code de l'environnement, la présente étude d'impact sera donc mise à jour en lien avec l'étude de maitrise des risques.

3.2 Maîtrise du risque sur le projet Cigéo

Une partie importante des éléments reportés dans ce chapitre provient du dossier d'options de sûreté (DOS) et des avis qui ont été rendus sur ce dossier par l'ASN et l'IRSN. Ces informations issues du DOS ne sont donc pas toutes directement accessibles dans le dossier de DUP et n'ont fait l'objet que d'une analyse rapide des principes par les rapporteurs, sans entrer dans le détail des analyses, par ailleurs parfois indisponibles. Les descriptions et analyses en restent parfois au simple report des instructions et réglementations et à leur simple déclinaison formelle au cas de Cigéo par des indications du type « *la conception devra…* ».

Le concept de défense en profondeur s'applique à Cigéo comme pour toute installation nucléaire de base (INB) conformément à l'arrêté du 7 février 2012. Ce principe de sûreté doit garantir un niveau de sûreté et de sécurité conforme aux objectifs de sûreté et de radioprotection. Il consiste à interposer entre la source de danger (ex : la substance radioactive) et le public, les travailleurs ou l'environnement un nombre suffisant de dispositions techniques et organisationnelles éliminant ou limitant ses nuisances jusqu'à un niveau acceptable. Il prend en compte l'éventualité de défaillances techniques, organisationnelles et humaines ainsi que la mise en place de lignes de défense graduées à l'égard des dangers internes et externes à l'installation pour y faire face et en limiter les conséquences.

Selon l'ASN[67], le dossier d'options de sûreté montre que l'Andra a :

- correctement identifié et étudié les perturbations qui pourront affecter la roche hôte ainsi que les phénomènes qui se produiront pendant les phases transitoires (thermique, hydraulique, mécanique…) qui résulteront de l'implantation du stockage. Les résultats présentés tendent à indiquer que leur extension devrait être limitée par rapport à l'épaisseur de la roche hôte ;
- retenu des principes satisfaisants dans la démarche de sûreté en exploitation et après fermeture, cohérents avec le guide de sûreté de l'ASN de février 2008 et les travaux d'instances internationales ;
- mais que des incertitudes demeurent, inévitables et inhérentes à ce stade de développement du projet.

Elle souligne deux difficultés dans la conception du projet telle que présentée dans le DOS :

- des incertitudes demeurent concernant le comportement physico-chimique et thermique en stockage de certains colis, les colis de déchets bitumés , en particulier en situation d'incident ou d'accident conduisant à une élévation de température ; les colis bitumés représentent 18 % du nombre de colis de l'inventaire de référence ;
- les éléments présentés dans le DOS n'ont pas entièrement répondu à sa demande concernant le rétablissement des fonctions du stockage à la suite d'un accident ; la possibilité d'intervenir et le cas échéant, de réhabiliter l'installation, est pourtant une priorité ; un scénario d'effondrement[68] devra notamment être analysé en intégrant l'analyse du retour d'expérience.

[67] Avis ASN n°2018-AV-0300 précité

L'Ae observe que le développement du projet Cigéo s'appuie, depuis son origine, sur des itérations périodiques entre connaissances scientifiques et technologiques, sûreté et conception. Cette mise à jour tient compte des avancées au niveau international avec un processus d'instruction piloté par l'ASN. L'évaluation de ce dossier par l'ASN est réalisée avec l'appui des experts en sûreté de l'IRSN et de groupes permanents d'experts pluralistes. En complément, des revues internationales permettent de confronter les évaluations de sûreté menées par l'Andra aux meilleures pratiques internationales. Trois revues internationales ont été menées sur le projet en 2001, 2005 et 2016 et sept itérations de sûreté ont été réalisées depuis 1991. Tous les dix ans, l'Andra devra procéder au réexamen de sûreté périodique de l'INB du centre de stockage Cigéo, en prenant en compte les meilleures pratiques internationales.

Le projet Cigéo constitue un établissement original voire unique dans le sens où il rassemble sur un même lieu des problématiques d'INB, d'installations industrielles à risques, de travaux souterrains (travaux « miniers ») et de stockages passifs de déchets, avec des problématiques différentes. Leur traitement nécessite d'ouvrir très largement les compétences et expertises mobilisées, ce qui ~~lui~~ semble opportun pour certains sujets selon l'analyse que les rapporteurs ont pu faire dans l'état actuel du dossier.

Le projet Cigéo est évolutif, avec des étapes clé qui présentent des aléas de natures et d'intensités différentes. L'Andra souligne la nécessité d'intégrer l'ensemble des étapes dans la conception du projet, y compris dans ses aspects de maîtrise des risques. Il a semblé important que la démarche de maîtrise des risques, intégrée, puisse dans un premier temps se focaliser sur la sécurité du seul site de stockage passif. Cette première étape devrait prendre en compte les différents scénarios, concernant à la fois la nature et le volume des déchets et les solutions techniques de stockage (dimensionnement et répartition surfacique des alvéoles, …). C'est sur cette base que devrait alors se construire la conception et la maîtrise de la sécurité de la logistique d'approvisionnement du stockage passif.

La démarche présentée par l'Andra dans les dossiers consultés, le report de certaines vérifications sur les conditions de sécurisation du stockage, par exemple, laissent penser que cette logique n'est pas pleinement suivie.

La maîtrise des risques pour les travaux et le stockage souterrains doit pleinement s'appuyer sur une double approche déterministe et probabiliste, quel que soit l'aléa envisagé, en particulier pour les risques d'agression externe après fermeture du stockage, pour les risques naturels, pour la prise en compte des caractéristiques physiques du milieu ou des matériaux (conductivité thermique, résistance des matériaux, perméabilités…). Les conclusions de l'approche probabiliste doivent prendre en compte les durées de fonctionnement des installations qui peuvent être d'un à plusieurs ordres de grandeur supérieures à celles des installations à risques habituelles (INB, industries), en

[68] Vraisemblablement d'une partie des travaux souterrains

particulier pour la définition des situations de fonctionnement, en particulier des situations de dimensionnement du plan d'urgence interne (PUI), exclues ou extrêmes.

La possibilité de récupérer les colis constitue un élément clé, pour l'adaptabilité du projet à l'évolution des connaissances et à la définition de son utilité publique. Il est donc fondamental que le projet s'appuie sur une analyse approfondie des conséquences du risque de ne pas pouvoir les récupérer (Cf. Stocamine).

De façon consolidée pour ce qui concerne la méthode d'analyse des risques, l'Ae recommande

- ***de croiser des compétences et des expertises de natures et d'origines variées ;***

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R39

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes.

Dans le cadre du processus itératif entre l'évaluation de sûreté, la conception et les connaissances scientifiques et technologiques, et plus particulièrement dans un objectif de maitrise des risques et incertitudes résiduelles tant en exploitation qu'en après fermeture, l'Andra fait appel à des compétences nombreuses et de nature diverses et complémentaires. Celles-ci couvrent ainsi un vaste champ de domaines qui sont au cœur de la conception, la réalisation, l'exploitation et la sûreté du stockage géologique : par exemple les géosciences (géologie, sédimentologie structurale, géomécanique, géochimie, tectonique/sismicité, hydrogéologie…), l'environnement, la radiochimie, les sciences des matériaux, les sciences du climat, les travaux souterrains, le génie civil, le génie nucléaire, les mathématiques appliquées, la simulation numérique, la métrologie, la science des données, la radioprotection, la sécurité incendie…

L'Andra s'adresse ainsi à des organismes divers (centres de recherche, universités, établissements publics à caractères scientifiques et technologiques, ingénieries, grands groupes de la filière nucléaire des travaux publics ou travaux souterrains, institutions/associations professionnelles…) dont la compétence dans un domaine donné est reconnue. Cela permet à l'Andra de disposer d'une base de connaissances et d'analyse solide dans chaque domaine mobilisé. Par ailleurs, en regard du caractère pluridisciplinaire des sujets traités, l'Andra établit le croisement entre les différentes compétences et domaines afférents, afin notamment de s'assurer de la cohérence d'ensemble, notamment en termes d'analyse de risques et de sûreté.

L'Andra croise ses connaissances avec les experts au niveau international en s'impliquant fortement dans des coopérations internationales, notamment avec ses homologues étrangers, au travers de collaborations bilatérales ou multilatérales (Andra-NAGRA par exemple…) ou d'instances internationales (projet AEN Clay Club, base de données AEN FEPs et FEPCAT, MODERN 2020, projet AIEA GEOSAF…). Cela permet également aux agences de disposer en commun d'une base éprouvée de connaissances, de méthodes et d'analyses ainsi que partager les retours d'expérience.

En termes de gouvernance interne, l'Andra s'appuie sur différentes instances indépendantes et constituées d'experts reconnus dans leur domaine, en particulier un conseil scientifique et des comités techniques spécialisés, comme le comité industriel, le comité des travaux souterrains, le comité des expérimentations dans le Laboratoire souterrain, ou le comité sûreté et environnement. Ces instances contribuent au système de revues internes dédiées à l'analyse des données, modèles et choix de sûreté à retenir pour les évaluations de sûreté (5). Ces revues permettent de valider les choix et leurs justifications.

Ainsi :

- le conseil scientifique de l'Andra, nommé par décret par les tutelles de l'agence, est chargé d'émettre des avis et recommandations sur les priorités des recherches menées par l'Andra et d'en évaluer les résultats, notamment en regard des enjeux d'acquisition ou d'utilisation des connaissances scientifiques et technologiques pour la conception et la sûreté du système de stockage. À ce titre, le Conseil scientifique a examiné systématiquement tout ou parties des dossiers antérieurs afférents et à chaque itération de sûreté/conception/connaissances ;
- le comité de sûreté et environnement s'inscrit dans le processus de revues de conception à chaque étape clé du développement du projet de centre de stockage Cigéo (esquisse, avant-projet sommaire, avant-projet détaillé.).

Enfin, comme indiqué au chapitre 4 du volume II de l'étude d'impact, différentes revues ou équivalents externes ont été menées :

- depuis 1991, les différents dossiers afférents au développement du projet Cigéo sont soumis à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui a émis des avis et recommandations, notamment pour le dossier d'options de sûreté établi par l'Andra en 2016 en vue de la demande d'autorisation. Ses avis sont établis sur la base d'un travail d'évaluation mené par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté (IRSN) et soumis à des groupes permanents d'experts (maillon important de l'organisation de la sûreté nucléaire en France, un groupe permanent d'experts est une instance constituée d'experts nommés en raison de leurs compétences et de leur expérience professionnelle. Ils sont issus des milieux universitaires et associatifs mais aussi des exploitants concernés par les sujets traités et de l'IRSN). L'Autorité de sûreté effectue également des visites notamment sur le Centre de Meuse/Haute-Marne au cours desquelles elle porte une appréciation sur la qualité de travaux en cours, en particulier dans le Laboratoire souterrain ;
- instaurée par la loi du 30 décembre 1991 puis celle de 2006, la Commission Nationale d'Évaluation (CNE) a pour mission d'évaluer la qualité des travaux de l'Andra et produit un rapport annuel dans lequel elle émet un avis sur ces travaux. Ses avis et recommandations constituent des données d'entrées pour affiner les priorités du programme de recherche et de manière général les travaux de conception et d'évaluation de sûreté du projet Cigéo. La CNE rend compte à l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques (OPECST) ;
- des revues des grands dossiers du projet Cigéo par les pairs ont été organisées sous l'égide de l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique — anglais International Atomic Energy Agency).

Le comité local d'information et de suivi (Clis) du Laboratoire de Bure a aussi mandaté en propre des expertises, comme sur la géothermie, ou la revue de grands dossiers de l'Andra par des organismes indépendants, comme l'IEER (Institute for Energy and Environmental Research) (https://Clis-bure.fr).

Enfin, le dossier de demande d'autorisation de création de l'INB du centre de stockage Cigéo (article R. 593-16 du code de l'environnement), comprendra une pièce dites « capacités techniques de l'exploitant » dans laquelle l'Andra indiquera « *notamment les ressources techniques dont il dispose, l'organisation mise en place dans ce domaine et l'expérience dont il peut se prévaloir dans l'exploitation d'installations nucléaires* ».

- ***de construire la démarche de maîtrise des risques en partant de la sécurité du projet dans sa finalité, à savoir le stockage après fermeture, en incluant plusieurs scénarios plausibles et contrastés de définition du gisement de déchets devant être stockés, d'en analyser les avantages et inconvénients en termes de durée de vie, d'environnement et de sécurité et de justifier le parti retenu ;***

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R39

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions concernant la démarche retenue qui, en s'appuyant sur les scénarios prospectifs de l'inventaire national des matières et des déchets radioactifs, considère les possibles inventaires de déchets produits par différents scénarios de production de déchets radioactifs.

Les inventaires de référence et de réserve retenus pour les études en phase de conception initiale du centre de stockage Cigéo découlent des inventaires prospectifs évalués dans l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN) sur la base de quatre scénarios contrastés d'évolution de la politique énergétique française à long terme répondant aux prescriptions du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) et prenant en compte les orientations de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Ainsi, les inventaires prospectifs de l'édition 2018 de l'IN sont établis selon trois scénarios de renouvellement du parc électronucléaire français actuel et un scénario de non-renouvellement.

L'objectif de ces scénarios est d'encadrer et d'illustrer les évolutions possibles de politique énergétique en prenant en compte les incertitudes. Ils illustrent d'une part la poursuite des tendances actuelles et d'autre part les conséquences de choix plus en rupture. Les scénarios de renouvellement supposent le déploiement de nouveaux réacteurs qui remplaceront les réacteurs du parc électronucléaire actuel, avec des hypothèses différentes sur le type de réacteur déployé. Les scénarios de renouvellement du parc postulent de fait l'existence de réacteurs capables de consommer le plutonium recyclé et non consommé par le parc actuel, à l'échéance du renouvellement du parc. Le scénario de non-renouvellement correspond à l'arrêt de la production électronucléaire au bout de 40 ans de fonctionnement (60 ans pour l'EPR). Aucun réacteur ne sera déployé en remplacement des réacteurs du parc électronucléaire actuel.

Les producteurs-détenteurs ont estimé en ordre de grandeur, pour ces quatre scénarios, les quantités de déchets et de combustibles usés générés par l'ensemble des installations nucléaires (autorisées à fin 2016) jusqu'à leur fin de vie, c'est-à-dire jusqu'à la fin de leur démantèlement.

L'inventaire de référence du centre de stockage Cigéo faisant l'objet de la demande d'autorisation de création correspond à la production des déchets issus des installations autorisées aujourd'hui dans le scénario de poursuite de la production électronucléaire avec une hypothèse de durée de fonctionnement des installations existantes de 50 ans, et de retraitement de la totalité des combustibles usés produits par ces installations dans le parc actuel et dans un parc futur.

L'inventaire de réserve couvre les trois autres scénarios, à savoir la poursuite de la production électronucléaire sur une durée allongée de dix ans environ par rapport au scénario de l'inventaire de référence et en considérant deux stratégies différentes en matière de retraitement des combustibles usés et le scénario d'arrêt de la production électronucléaire.

L'impact de ces scénarios sur le dimensionnement de l'installation (architecture du stockage, dimensionnement des équipements, sûreté durant la phase d'exploitation du stockage et après sa fermeture…) est étudié. Le dossier de demande d'autorisation de création reposera sur le dimensionnement de l'installation nécessaire pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence. L'impact de l'inventaire de réserve sur le dimensionnement de Cigéo est présenté au titre de la démonstration de l'adaptabilité du stockage.

- ***de se baser sur une double approche déterministe et probabiliste, à mettre en perspective de la durée de vie des installations, et d'en tirer les conclusions quant à la classification des situations de fonctionnement de faibles probabilités ;***

RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R39

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes.

L'analyse de risque en phase de construction initiale prend en compte l'ensemble des principes d'analyse de risques. Elle porte sur les risques conventionnels et professionnels. Les risques sont hiérarchisés et évalués sur la base d'un couple probabilité/gravité. Des dispositions de prévention et de protection sont définis afin de s'assurer que le niveau de risque est acceptable.

Conformément à l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base, la démonstration de la sûreté en phase de fonctionnement des centres de stockage de déchets radioactifs repose sur le principe suivant : « *La démonstration de sûreté nucléaire est réalisée selon une démarche déterministe prudente.* » fondée sur le concept de défense en profondeur, c'est-à-dire que les dispositions de conception retenues sont justifiées par l'étude d'accidents et par l'application de règles et critères qui incluent des marges et des conservatismes. La méthodologie associée à la démonstration de sûreté est présentée dans la réponse à la recommandions R38. Au cas par cas et conformément aux guides et règles fondamentales de sûreté de l'ASN, l'Andra définit les caractéristiques retenues pour évaluer la sûreté face à certaines agressions externes au regard d'une probabilité d'occurrence fondée sur l'exploitation de données statistiques disponibles (chute d'avion, évaluation d'aléa sismique, niveau de pluie…).

Conformément au guide de sûreté de l'ASN de 2008 (24) , la sûreté après fermeture du système de stockage Cigéo une fois l'INB du centre de stockage fermé définitivement relève du principe de défense en profondeur, principe internationalement retenu pour la conception et l'exploitation des installations nucléaires. Cela se traduit par l'attribution aux différents composants du système (couche de Callovo-Oxfordien, composants ouvragés) de diverses fonctions de sûreté complémentaires. L'évaluation de la sûreté s'appuie sur une approche déterministe fondée sur :

- l'analyse notamment de l'analyse de la connaissance du comportement dans le temps des composants du système de stockage ;
- l'analyse qualitative des risques et incertitudes en lien notamment avec l'état de connaissance du comportement et des fonctions de sûreté assurer ;
- l'identification d'un jeu de scénarios et leur quantification.

- ***d'approfondir l'analyse du risque de ne pas pouvoir récupérer des colis.***

RÉPONSE DE L'ANDRA A LA RECOMMANDATION R39

L'Andra prend acte de cette recommandation et confirme que le risque de ne pas pouvoir récupérer les colis est pris en compte dans l'ensemble des analyses de sûreté et permet de garantir que l'absence de retrait de tout ou partie des colis n'entrainerait pas d'impact allant au-delà des limites fixées par la réglementation.

La réglementation demande que le caractère réversible de Cigéo soit assuré. Le code de l'environnement définit la réversibilité comme « *la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. La réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation d'un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique. Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.* ». La réversibilité inclut donc la récupérabilité.

La durée minimale pendant laquelle, à titre de précaution, la réversibilité du stockage doit être assurée sera fixée par l'autorisation de création de Cigéo. Cette durée ne peut être inférieure à cent ans. La possibilité de récupérer les colis est prévue à la conception. Par ailleurs, l'exploitation de Cigéo débute par une phase industrielle pilote permettant de conforter le caractère réversible de l'installation, notamment par un programme d'essais *in situ*. Pendant cette première phase, les exigences de récupérabilité sont encore plus importantes et le code de l'environnement prévoit que « *Tous les colis de déchets doivent rester aisément récupérables durant cette phase.* ».

La principale raison qui pourrait conduire à un choix de retrait des colis serait une évolution des solutions de gestions retenues par les générations futures. Si malgré les dispositions prises pour garantir la récupérabilité, les colis ne pouvaient, en tout ou partie être récupérés, la sûreté de l'installation resterait assurée. En effet, dans un stockage, par conception, les déchets ont vocation à être stockés sans limite de durée. L'article L. 542-1-1 précise que *« Le stockage de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542-1, sans intention de les retirer ultérieurement.* ». Ainsi, l'Andra mène des évaluations de sûreté après fermeture en considérant tous les colis de l'inventaire de référence stockés depuis la mise en stockage du premier colis et qu'aucun colis n'a été retiré afin de maximiser l'impact après fermeture et à long terme. Dans ce cas, l'absence de retrait de tout ou partie des colis n'entrainerait pas d'impact allant au-delà des limites fixées actuellement par la réglementation.

Par ailleurs, dans une approche prudente, parmi l'ensemble des scénarios d'évolution du stockage après la fermeture, l'Andra étudie un scénario de défaillance de conteneur de stockage de déchets vitrifiés (ces déchets sont les plus actifs) et donc n'ayant plus de performance (comme indiqué au chapitre 18.2 du volume IV de l'étude d'impact). Considérer dans l'évaluation de sûreté après fermeture long terme ce scénario permet de vérifier que les incidences sur l'homme et l'environnement restent, non significatives et respectent les objectifs fixés par le guide de l'ASN de 2008, même dans le cas du maintien en stockage d'un colis aux performances dégradées.

Ces éléments seront par ailleurs complétés dans le cadre de la DAC au travers des études de gestion post-accidentelles.

L'Ae souhaite soulever quelques points ciblés concernant le stockage souterrain :

Accidentologie

Parmi les éléments de connaissance, l'accidentologie représente un aspect important, en particulier pour ce qui concerne les travaux souterrains et le stockage. Elle doit couvrir l'éventail très large des risques présentés par le projet Cigéo (risques nucléaires, autres risques technologiques, risques miniers ou assimilés, risques naturels, voire conflits…) et devra intégrer les différents incidents ou accidents qui ont déjà eu lieu ou qui pourront avoir lieu sur le laboratoire souterrain, et demain sur Cigéo. Or, les documents mis à disposition ne comprennent qu'une analyse limitée et ne mentionnent pas les accidents qui ont eu lieu au sein du laboratoire souterrain du fait d'effondrements au cours des travaux de creusement. Ce point est important tant pour la stabilité du stockage, la possibilité de récupérer des colis de déchets mais également la sécurité des opérateurs pendant les travaux.

Évacuation de la puissance thermique des colis

Les colis stockés ayant une chaleur résiduelle encore importante, l'aspect thermique est un facteur majeur de la sûreté du stockage, alors que le projet représentera un dégagement d'énergie considérable pouvant aller jusqu'à 25 MW dans les premiers temps du stockage. Cette puissance est à la fois répartie sur une surface importante, de l'ordre de 10 km² de terrain, mais également concentrée sur des alvéoles de faibles diamètres et de faibles surfaces de contact. Au niveau de l'alvéole, les différents contacts entre colis, tubes d'acier, coulis de ciment et argilites peuvent constituer des obstacles au flux thermique et accroître la température à l'intérieur de l'alvéole et des colis. Une température trop élevée de l'argilite pourrait en modifier ses propriétés les plus intéressantes (perméabilité, fermeture des fissures…). Une température trop élevée des alvéoles pourrait en affecter les propriétés physiques et mécaniques et favoriser les phénomènes de corrosion.

Selon l'Andra, l'installation souterraine est conçue de façon à ce que l'évacuation de la chaleur dégagée par les colis de déchets placés dans les alvéoles de stockage puisse s'effectuer par conduction passive dans la roche. Selon le dossier, en tenant compte des hypothèses actuelles d'espacement entre alvéoles et d'agencement des colis, les évaluations préliminaires montrent que les limites de sécurité fixées ne seront pas atteintes pour la température de l'argilite au contact des alvéoles de stockage HA1/HA2, soit 90°C. Un graphe représentant les températures atteintes en différents points est présenté à l'appui de cette conclusion: cœur du verre, paroi de l'alvéole, entre-axe entre alvéole, toit de l'alvéole… En tout point hors des colis, la température ne dépasse jamais les 80°. Les températures s'élèvent progressivement dans l'argile avec l'arrivée du flux thermique pour atteindre un maximum de température (45/50°C après un millier d'années environ pour le toit et le mur des argilites) puis baisse du fait de la décroissance thermique des colis.

L'Ae s'interroge cependant sur les résultats des modèles et sur certains protocoles d'essais effectués dans le laboratoire souterrain pour en vérifier les calages : le délai de 10 années semble important pour atteindre le maximum thermique à cœur de verre des colis HA, alors même que la température maximale atteinte semble faible (95°C) ; la différence de maximum thermique entre le contact alvéole/argilite (70/75°C) et le demi-entraxe entre alvéoles (45/50°C) apparaît également faible. Les rapporteurs ont interrogé l'Andra sur ces différents points et sur la justification des hypothèses des conditions aux limites du modèle, mais n'ont pas obtenu à ce jour de réponses satisfaisantes.

Analyses des risques d'agressions d'origine anthropique

Le site a été choisi pour limiter les possibilités d'agressions d'origine anthropique liée à des possibilités d'exploitation des ressources naturelles, comme indiqué par le guide de sûreté relatif au stockage en formation géologique profonde (ASN 2008).

Le dossier mentionne ainsi que les possibilités d'exploitation géothermique du sous-sol sont relativement banales et impliqueraient l'amélioration des technologies d'exploitation des gisements à forte salinité. Néanmoins, une étude indépendante[69], réalisée par le laboratoire suisse Géowatt, à la demande du comité local d'information et de suivi, souligne les insuffisances des études de l'Andra, et conclut à l'inverse « *que les ressources géothermiques au Trias dans la région de Bure peuvent aujourd'hui être exploitées de manière économique avec l'emploi de techniques et de matériel appropriés* ». Compte-tenu de l'importance de ce sujet qui conditionne l'éventuelle faiblesse du risque d'exploitation du sous-sol à l'avenir, cette question devra être sérieusement approfondie pour les autorisations ultérieures.

D'autres agressions d'origine anthropique sont également envisageables et n'ont pas été prises en compte dans le dossier, et notamment :

- la sismicité locale peut être accrue par l'exploitant lui-même, par ses travaux souterrains, ses autres travaux ou le fonctionnement général des installations ;
- la sismicité locale peut être également accrue par d'autres activités, même à distance du site : l'actualité en a fait état pour l'exploitation de forages géothermiques profonds, dans les régions de Strasbourg et de Bâle ; plus directement lié au site de Bure, l'exploitation du gaz « coussin » dans d'anciens stockages en gisement « déplété[70] » peut également générer des

[69] Badoux V. 2013. Rapport D1320/01 Revue du déroulement des opérations du forage géothermique au Trias réalisé par l'Andra, avis critique et seconde opinion sur l'évaluation du potentiel géothermique.

[70] épuisé

séismes, comme cela a été le cas en Espagne[71] ; des études sont en cours pour exploiter ainsi le gaz résiduel de l'ancien gisement de Trois Fontaines-l'Abbaye, à une trentaine de km de Bure.

Les possibilités d'agressions d'origine anthropique du stockage et des travaux souterrains méritent donc d'être complètement inventoriées et nécessitent d'en quantifier le risque et de définir des critères de compatibilité avec l'exploitation de Cigéo. Cet aléa, avec les incertitudes nées de la durée de dangerosité du site, justifierait de définir des périmètres de protection, où ces activités à risques seraient interdites ou réglementées sur le long terme.

L'Ae recommande :

- ***d'approfondir l'analyse des accidents pertinents pour les travaux et stockages souterrains de Cigéo, et en particulier analyser tous les incidents et accidents survenus au sein du laboratoire souterrain ;***

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R40

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes.

L'analyse approfondie des accidents survenus dans le Laboratoire souterrain est systématiquement conduite par l'Andra. Des retours d'expérience en sont tirés pour l'amélioration des chantiers actuels et capitalisés en vue des futurs chantiers de construction bien que les caractéristiques puissent être assez différentes. Dans tous les cas, les accidents/incidents survenus relèvent de problématiques de chantiers sans lien ni remise en cause des caractéristiques du milieu géologique et des fondamentaux du stockage.

Au-delà du présent mémoire, ces éléments seront dans l'étude de maîtrise des risques du dossier de demande d'autorisation de création qui conformément à l'article R. 593-19 présentera « *une analyse des retours d'expériences d'installations analogues* ».

A) Incidents et accidents survenus au sein du Laboratoire souterrain

L'analyse approfondie des accidents survenus au sein du Laboratoire souterrain est systématiquement conduite par l'Andra ou par des experts indépendants pour les accidents les plus graves.

Ainsi la première partie ci-après revient sur les conditions dans lesquelles se sont produits les accidents mortels et graves dans l'installation souterraine, depuis le début de sa construction (à savoir les deux accidents mortels de 2016 et 2002, et un accident ayant entrainé un long arrêt maladie pour un employé en 2010) et les retours d'expérience intégrés à la suite. La deuxième partie est consacrée à l'accidentologie en général, sa traçabilité et le processus d'amélioration continue associée.

- **Les accidents mortels et graves**
  - ✓ Accident mortel de 2016

    Le 26 janvier 2016, un accident de chantier s'est produit dans le niveau principal du Laboratoire souterrain, sis à 490 m de profondeur, au cours du creusement du carrefour de grand diamètre GCR2/GVA2, au front de la travée « T13 ». La galerie GVA2 n'étant pas encore creusée.

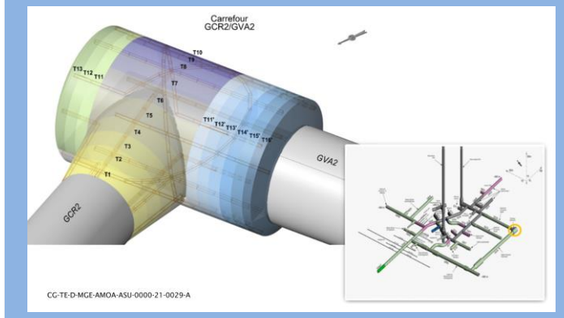


Figure 2-40 Carrefour GCR2/GVA2

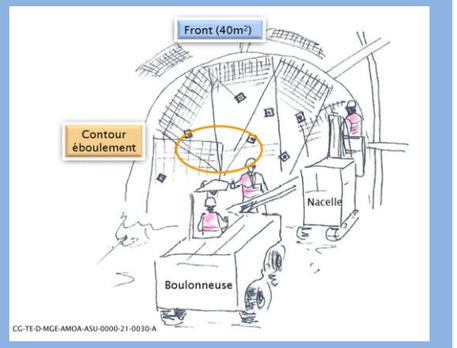


Figure 2-41 Schéma de boulonnage

Cet accident est intervenu alors que 3 employés de l'entreprise Eiffage effectuaient une opération de confortement des parois de la galerie à proximité immédiate du front de taille (T13). Cette étape du cycle de creusement/soutènement, mainte fois réalisée sans jamais causer d'incident, ni d'accident en dix ans, consiste à poser des boulons métalliques radiaux à l'aide d'une boulonneuse afin de maintenir la roche.

Environ 8 mètres cube de roche se sont soudainement décrochés du front de taille (d'une surface totale de 40 m²), pourtant sécurisé par 17 boulons de fibre de verre et du treillis soudé, et les débris de roche sont tombés sur un des intervenants. Malgré l'intervention très rapide des secours, celui-ci est décédé. Les deux autres employés ont été pris en charge et orientés vers les secours médicaux : l'un a été légèrement blessé à la main et l'autre choqué psychologiquement.

Suite à cet accident, une instruction judiciaire a été ouverte afin d'en déterminer les causes précises et les responsabilités associées. Cette procédure est toujours en cours auprès du tribunal correctionnel de Bar-Le-Duc.

L'Andra a souhaité néanmoins disposer d'une analyse technique lui permettant d'alimenter sa compréhension des causes de cet accident et d'en tirer les enseignements utiles à l'adaptation éventuelle des procédures et méthodes de réalisation des galeries et carrefours. À cet effet, son Directeur général a missionné un groupe d'experts indépendants de niveau international, ayant pour mission d'appuyer l'Andra dans la compréhension de l'accident et l'identification des mesures techniques susceptibles d'être prises. L'analyse menée par ce comité d'experts a permis de cerner une combinaison de facteurs à l'origine de l'accident :

- ✓ l'opérateur était placé à proximité du front, pas encore complètement soutenu. Il tournait le dos au front et la boulonneuse entravait la fuite de la victime ;
- ✓ une configuration de creusement inédite en L de l'intersection GCR2/GVA2, avec un enchainement des creusements dans deux directions différentes (σ_H et σ_h), générant localement une fracturation complexe au début du creusement de l'intersection GCR2/GVA et un report de charges avec ponctuellement une densité importante de fractures ;
- ✓ un soutènement du front par boulons non homogène en densité, associé à l'absence d'une couche de béton projeté pour assurer la stabilité du front durant la mise en œuvre du boulonnage radial, en regard des discontinuités à même de générer des blocs susceptibles de se désolidariser du massif d'argilite.

  Les experts en ont alors déduit des recommandations qui ont été transmises à la maîtrise d'œuvre et au prestataire de creusement. Ces derniers se sont appropriés ces recommandations et les ont déclinées dans leur propre process de maîtrise des risques, et ce, avant toute reprise du chantier :
- ✓ modification des modes opératoires :
  - la position des opérateurs et des engins a été revue, en particulier, lors du soutènement du front par boulonnage ;
  - aucun intervenant ne peut accéder à un front non complètement soutenu ;
  - mise en place du béton projeté systématique et dans un délai plus rapide ;

- boulonnage radial effectué avec un front complètement soutenu ;
- mise à jour annuelle du PPSPS et actualisation des fiches de tâches.

✓ Multiplication des approches de dimensionnement par la maîtrise d'œuvre pour les calculs de stabilité

Les enseignements de ce type d'accident ont donc été tirés. Néanmoins, si un tel accident de chantier se produisait lors d'activités similaires dans le centre de stockage Cigéo (qui seront limitées de par l'utilisation privilégiée des tunneliers), cela n'aurait aucune conséquence sur les opérations de stockage des déchets radioactifs elles-mêmes. En effet, une des caractéristiques du projet est la gestion dissociée de l'activité de stockage des déchets (exploitation) et celle de creusement des alvéoles (travaux). Ces zones seront séparées physiquement et fonctionneront indépendamment afin d'assurer la sécurité du centre de stockage Cigéo.

Quant à la roche dans laquelle est située le Laboratoire (identique à celle sélectionnée pour l'implantation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo), cette dernière a avant tout été choisie pour ses capacités de confinement des radionucléides. L'accident n'a révélé aucun comportement nouveau, ni anormal de la roche. Sa stabilité mécanique, suite à l'endommagement créé lors de son creusement, est assurée par un système de soutènement installé au fur et à mesure de l'avancement du front de creusement. Ce procédé est utilisé communément pour la réalisation des ouvrages souterrains.

- **Accident mortel de 2002**

Lors de la construction du Laboratoire, un accident mortel est survenu en mai 2002. Il était d'une nature différente : il s'est produit lors du creusement du puits principal (travaux en élévation) et non dans une galerie (travaux horizontaux). Un tube de ventilation, dont le dispositif de déploiement était consigné, a été manœuvré alors que son mode était inversé. Cela a eu pour conséquence le détachement du tube, qui est tombé sur un ouvrier qui travaillait sur le sol du puits. L'enquête a mis en cause les relations entre les opérations de creusement et la maintenance (toutes deux sous responsabilité du Groupement Fond Entreprises, dit « GFE », s'agissant d'un contrat de conception-réalisation). Le groupement a été retenu responsable judiciairement parlant et s'est vu condamné. Les autorités ont imposé la mise en place d'un plan de maintenance améliorée et la création d'une fonction (indépendante de la production) de responsable d'état machine.

En outre, pour répondre à la nécessité de sécuriser le chantier et permettre son redémarrage, l'Andra s'est dotée d'une équipe d'experts spécialisés en travaux miniers, originaire d'Afrique du Sud, dont le rôle a été précisément d'analyser, de contrôler et par là-même d'aider le groupement à assurer une meilleure prévention des risques. Là encore, les analyses ont été conduites et les retours d'expérience tirés pour améliorer la sécurité des chantiers sans lien avec les fondamentaux du stockage souterrain.

- **Autres accidents graves**

Outre les deux accidents mortels cités ci-dessus, un seul autre accident grave, ayant entraîné un arrêt de travail de plus d'un an, s'est produit dans le Laboratoire souterrain en 20 ans.

Cet accident est survenu le 24 mars 2010 lors du creusement de la galerie GET à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle (MAP). Un bloc de roche, issu de l'excavation en cours, d'environ 1,50 x 0,20 x 0,20 m se positionne en travers du tablier de convoyage de la machine et empêche l'évacuation des déblais. Le pilote arrête l'engin et demande, comme prévu dans les procédures, l'intervention de l'opérateur de surveillance pour casser le bloc. La machine étant à l'arrêt, l'opérateur de surveillance se place devant l'engin et pose le pied sur le tablier du convoyeur afin de dégager le bloc. En parallèle, le pilote accueille au poste de pilotage un salarié en formation. Le pilote présente le pupitre de commande au pilote apprenti. Au cours de l'explication, l'apprenti pilote demande la fonction de l'un des boutons du pupitre en le montrant du doigt et appuie physiquement dessus. Le bouton active le démarrage du convoyeur. Le pied droit de l'opérateur de surveillance se retrouve coincé sur le tablier de convoyage, dans l'étoile gauche. Le pilote déclenche immédiatement l'arrêt d'urgence, néanmoins l'extrémité du pied droit de l'opérateur est gravement touchée. Suite à cet accident, les modifications apportées ont porté sur deux axes :

✓ la machine :

- mise en place au niveau du poste de conduite d'un système vidéo avec quatre caméras ;
- mise en place d'un bouton de validation impliquant, pour le démarrage du convoyeur, d'appuyer simultanément sur ce bouton ainsi que sur le bouton de démarrage existant ;
- système de liaison opérateur/pilote par balises lumineuses rouge/verte : à chaque arrêt général de la machine, mise au rouge automatique de la balise. Pour repasser au vert, l'opérateur doit reconfirmer son action au boitier de commande ;

✓ la formation spécifique pour les opérateurs, pilotes, mécaniciens et chefs de poste :

- sécurités existantes et dispositifs complémentaires mis en place ;
- matériel à utiliser pour casser les blocs de marins.

B) Gestion de l'accidentologie et processus d'amélioration continu

Sur les neuf années du chantier de creusement n° 3 (2009-2018), ont été enregistrés 31 accidents sans arrêt et 16 accidents avec arrêt pour 2,3 millions d'heures travaillées par 250 entreprises différentes (dont 500 000 h pour Eiffage Génie Civil). Cela correspond à un taux de fréquence de 10. À titre de comparaison, la moyenne nationale du BTP est de 35,5 (référence 2018).

Chaque incident/accident est tracé par une fiche incident/accident. À la suite, un arbre des causes est systématiquement réalisé et découle la déclinaison d'un plan d'actions. Des ingénieurs sécurité sont chargés du bon suivi des plans d'actions. Ces fiches sont présentées à chaque réunion de direction du site (fréquence mensuelle). Une synthèse remonte également dans le tableau de bord de direction de l'agence. Enfin, les accidents et incidents sont présentés à chaque CISSCT[15] (fréquence trimestrielle) pour que l'ensemble des intervenants (entreprises extérieures comprises) bénéficie des analyses et intègre ce retour d'expérience.

Ainsi, l'enregistrement des accidents et des soins bénins permet d'établir une cartographie des risques (cf. Figure 2-42) et d'identifier les sièges principaux de lésions (cf. Figure 2-43) afin de mettre en place des actions de prévention spécifiques.

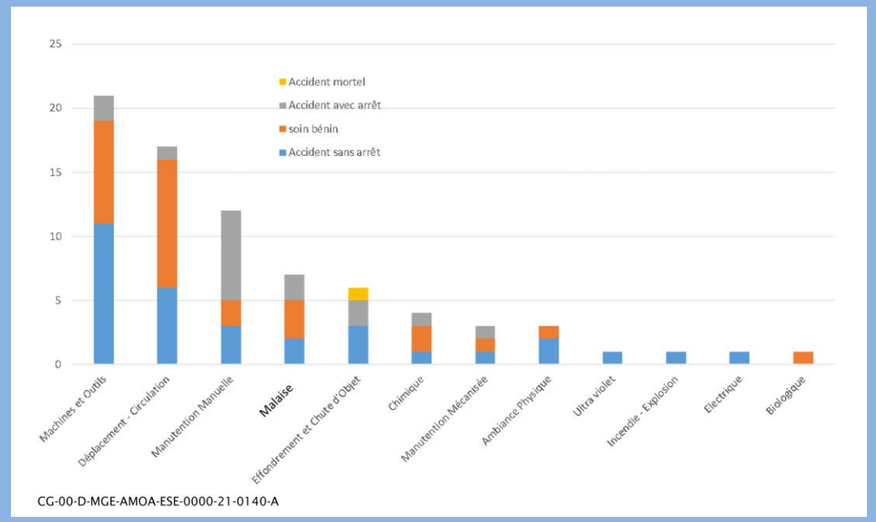


Figure 2-42 *Répartition des accidents et des soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3*

[15] Collège Interentreprises de Sécurité, de Santé et des Conditions de Travail.

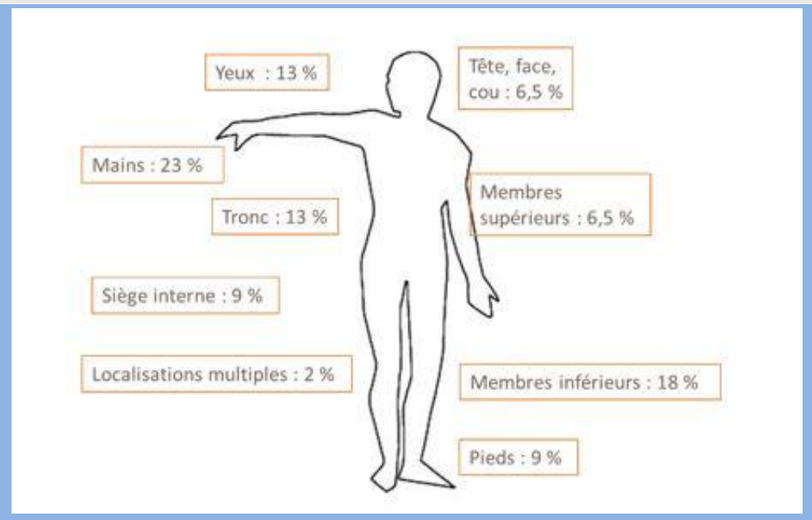


Figure 2-43 *Répartition des accidents et soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3 par siège de lésions*

- ***de produire une tierce expertise de la modélisation de la dissipation du flux thermique issu des alvéoles HA, à l'échelle des alvéoles et de son environnement direct et de la couche dans son ensemble ;***

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R40

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes sur l'historique des échanges scientifiques avec des instances nationales et internationales sur le sujet de la modélisation de la dissipation du flux thermique.

De façon générale, l'Andra appuie ses activités relatives au stockage géologique profond sur des bases scientifiques acquises par le monde de la recherche nationale et internationale. Cet appui de l'excellence scientifique est mené suivant des modalités diverses, en particulier des groupements de recherche nationaux (ex. avec le CNRS, par le passé le GDR FORPRO sur les géosciences, le GDR MOMAS sur la simulation numérique et actuellement le défis NEEDS) et internationaux (ex. actuellement le projet DECOVALEX sur la simulation numérique du comportement thermo-hydromécanique des roches https://decovalex.org), des partenariats avec de grands organismes de recherche, ou des grands programmes de recherche européens (ex. actuellement le *joint programming* EURAD qui réunit les agences, les évaluateurs comme l'IRSN, les organismes de recherche et auquel participe la société civile). Dans ce cadre le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne est un outil de recherche important pour mener des expérimentations *in situ* dans la roche argileuse, en particulier pour évaluer son comportement face à différentes sollicitations dont par exemple la thermique, et valider les modèles de comportement de la roche utilisé pour les travaux de conception et d'évaluation de sûreté du centre de stockage Cigéo.

En regard des enjeux, les travaux scientifiques ont fait et font toujours l'objet d'une évaluation indépendante continue à différents niveaux :

En premier lieu :

- par les pairs au travers en particulier des publications dans des revues à comité de lecture, des jurys de thèses, du Conseil scientifique de l'Andra, ou de la Commission nationale d'évaluation qui rend compte chaque année à l'OPECST et publie un rapport ;
- par les évaluateurs, en particulier l'IRSN et les revues internationales mandatées notamment par l'ASN ou le Groupe permanent déchets ;

En second lieu, par des expertises tierces, à l'initiative de parties prenantes comme le Clis (IEER) pour le dossier 2005 et le dossier 2009 (choix d'implantation du stockage) ou par Géowatt en 2013 pour la géothermie du site d'implantation du projet Cigéo).

Ces évaluations sont accessibles à tous, notamment sur les sites web de l'Andra et des évaluateurs et pour cette raison n'ont pas été systématiquement repris dans le dossier de demande d'utilité publique.

Cette connaissance scientifique a été examinée dans le cadre de l'instruction du dossier d'options de sûreté de Cigéo, pour lequel l'ASN indiquait *« Considérant que le dossier d'options de sûreté montre notamment que l'Andra a :*

- *Acquis une connaissance détaillée du site de Meuse/Haute-Marne, qui lui permet de confirmer la pertinence de la zone retenue pour l'implantation du stockage ;*
- *Mené de nombreuses études pour caractériser les évolutions des différents composants du stockage (colis, matériaux métalliques, cimentaires et argileux) et a constitué un ensemble important de connaissances à ce sujet ;*
- *Correctement identifié et étudié les perturbations (bactériennes, organiques, salines…) qui pourront affecter la roche hôte ainsi que les phénomènes qui se produiront pendant les transitoires (thermique, hydraulique, mécanique…) qui résulteront de l'implantation du stockage. Les résultats présentés tendent à indiquer que leur extension devrait être limitée par rapport à l'épaisseur de la roche hôte ».*

Ainsi, le choix du transfert de chaleur par conduction autour des alvéoles HA est notamment fondé sur les travaux de caractérisation du transfert de la chaleur dans le Callovo-Oxfordien, sur échantillons carottés en laboratoire jour, dans le Laboratoire souterrain (expérimentation TER, TED, CRQ), sur l'analyse des profils géothermiques naturels mesurés en forages profonds réalisés depuis la surface, et sur les travaux menés par nos homologues ayant l'argile comme formation hôte (Nagra en Suisse et Ondras-Niras en Belgique), en particulier dans des laboratoires souterrains (Mont Terri en Suisse www.mont-terri.ch ; Hades en Belgique https://euridice.be). Ce choix est retenu par l'ensemble des scientifiques travaillant sur le sujet (cf. Par exemple l'exercice internationale de modélisation et simulation numérique DECOVALEX 2019, TASK E relative à l'essai thermique TED mené dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, https://decovalex.org/D-2019/overview.html, regroupant différentes équipes de recherche).

- ***de reprendre les études du potentiel géothermique du sous-sol et d'organiser leur pilotage par un groupe de géologues indépendants ;***

⏩ RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R40

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes.

L'analyse de l'Andra concernant le faible potentiel géothermique du site d'implantation du projet de centre de stockage Cigéo est partagée par l'IRSN dans son rapport « Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne », RT/PRP-DGE/2014-00067 (53). En effet, la géothermie est présente partout, notamment dans le bassin parisien, mais une des exigences de l'ASN est que cette ressource ne soit pas exceptionnelle à l'endroit où l'on veut implanter un stockage.

Afin d'évaluer le potentiel géothermique de la future zone d'implantation du centre de stockage Cigéo, l'Andra a mené une opération de forage en 2007-2008, à la demande du Comité Local d'Information et de Suivi du laboratoire de Bure (Clis). Cette opération de forage profond (jusqu'à environ 2 000 mètres de profondeur) a été réalisée dans le cadre d'un programme qui a rassemblé la communauté scientifique. Ce programme, baptisé TAPSS 2000, a été organisé entre l'Andra et un consortium de 21 laboratoires (Universités françaises, CNRS, IFPEN, BRGM, IRD et IRSN). Le forage profond a été réalisé par l'Andra et mis à la disposition de la communauté scientifique. L'ensemble des données obtenues a permis à l'Andra de conclure à nouveau que le potentiel géothermique du site ne présentait ni caractère exceptionnel, ni intérêt particulier par rapport à d'autres zones ou formations géologiques dans le bassin parisien. Les conclusions de l'Andra n'ont pas été remises en cause par les contre-expertises indépendantes de l'IRSN, du BRGM et de Géowatt (mandatée par le Clis), ainsi que par la Commission nationale d'évaluation (cf. Rapport n° 8 de juin 2014, annexe II Géothermie, p53-55 (54)).

Bien que le site d'implantation du projet de centre de stockage Cigéo présente un potentiel géothermal banal, dans le cadre de l'évaluation de sûreté en après fermeture, l'Andra prend en compte des scénarios d'intrusion dans le stockage par forage, notamment à vocation d'exploitation géothermale. Ces scénarios ont été évalués à chaque grand jalon du développement du projet de stockage géologique (ex. dossier 2005, dossier de DOS). Ils le seront à nouveau pour le dossier de demande d'autorisation de création (DAC).

- ***d'inventorier les activités pouvant présenter des risques d'atteintes aux travaux et au stockage souterrain, dont celles de Cigéo, et si besoin, de définir des périmètres de protection autour de Cigéo où ces activités devront être réglementées ou interdites.***

» RÉPONSE DE L'ANDRA À LA RECOMMANDATION R40

L'Andra prend acte de cette recommandation et apporte ci-dessous les précisions suivantes.

Les activités présentant des risques font l'objet du chapitre 17 du volume IV de l'étude d'impact.

Comme mentionné dans la réponse à la recommandation 18, le centre de stockage Cigéo est conçu pour n'avoir aucun impact significatif sur la santé des personnes ou sur l'environnement en fonctionnement normal et après fermeture et pour ne pas générer un surcroît de risque inacceptable en cas d'accident. En effet, les impacts radiologiques du centre de stockage en fonctionnement normal sont quasiment négligeables et restent limités en cas d'accident (cf. Volume VI de l'étude d'impact, pièce 6 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique).

Un périmètre de protection des ouvrages souterrains, prévu obligatoirement par l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, sera défini et permettra de réglementer, via des servitudes, les usages des terrains. Ce périmètre de protection sera proposé dans le dossier de demande d'autorisation de création au sein d'une pièce spécifique dédiée aux servitudes et à la protection des installations du centre de stockage. Ce périmètre sera arrêté par le décret d'autorisation de création lui-même à l'issue du processus d'instruction du dossier de demande d'autorisation de création.

4 Mise en compatibilité des documents de planification

Le dossier comporte trois volumes consacrés à la mise en compatibilité des documents suivants :

- Schéma de cohérence territoriale (Scot) du pays Barrois ;
- Plan local d'urbanisme intercommunal (PLUI) de la Haute-Saulx qui concerne les communes de la Meuse : Gondrecourt-le-Château, Bonnet, Horville-en-Hornois, Houdelaincourt, Saint-Loire, Bure, Mandres-en-Barrois et Ribeaucourt et de la Haute-Marne : Cirfontaines-en-Ornois, Gillaumé, Saudron ;
- Plan local d'urbanisme (PLU) de Gondrecourt-le-Château.

Ces documents identifient précisément les documents existants et soulignent les modifications proposées. Ils comportent chacun un chapitre valant rapport d'évaluation environnementale qui reprend les éléments issus de l'évaluation environnementale du projet. Une annexe commune comporte l'évaluation des incidences sur les sites Natura 2000 sur ces territoires.

Le tableau 4 récapitule des incompatibilités et les solutions proposées dans le cadre de la mise en compatibilité de ces documents. La dernière colonne rappelle succinctement les observations et recommandations de l'Ae dont les détails sont explicités dans les chapitres précédents du présent avis.

[71] cfmr-roches.org/sites/default/files/manifestations/12-SSEE-Hevin-Storengy.pdf

» RÉPONSE DE L'ANDRA AU QUESTIONNEMENT DE L'AE

L'Andra prend acte de cette recommandation et souhaite indiquer que, comme explicité dans le chapitre 1.3.1.1 du présent document, la pièce 12 « Mise en compatibilité des documents d'urbanisme » du dossier de demande préalable d'enquête publique pour la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, a été mise à jour selon les réponses fournies par l'Andra dans le présent mémoire et plus particulièrement avec les éléments suivants :

- à propos de la mise en compatibilité du SCOT du Pays Barrois (cf. Volume I de la pièce 12) :
  - ✓ « *L'Ae souligne dans l'avis la sous-évaluation de l'importance écologique du Bois Lejuc comme réservoir et corridor de biodiversité. La recherche de solution alternative n'est pas complète sur ce point. L'Ae souligne l'importance de corridor qui a été sous-estimée par le dossier* » (page 56).

    Sur ce point voir chapitres 3.6.1 et 3.6.2 (réponses apportées aux recommandations R8 et R30).
  - ✓ « *L'Ae souligne la nécessité d'évaluer les impacts environnementaux des mesures de compensation agricole et forestière* » (page 56)

    Sur ce point, voir chapitre 3.8.8 (réponse apportée à la recommandation R32).
  - ✓ « *L'Ae recommande de mieux justifier (à propos de la carte du SCOT identifiant les ZAE) la position de la descenderie hors de la ZIRA* » (page 56)

    La descenderie est bien incluse dans la ZIOS (qui comprend le ZIRA et la descenderie).

- à propos de la mise en compatibilité du PLUi de la Haute Saulx (cf. Volume II de la pièce 12) :
  - ✓ *« L'Ae recommande de quantifier les impacts potentiels et résiduels sur la ressource en eau et de préciser les mesures ERC, leurs objectifs de résultats et les protocoles de suivi, en particulier pour ce qui concerne la recharge de la nappe, la réduction de l'artificialisation et l'alimentation en eau potable ».*

    Sur ce point voir chapitre 3.5.6 et 3.5.7 (réponses apportées aux recommandations R28 et R29).

De plus, l'annexe de la pièce 12 reprenant intégralement le volume V de la pièce 6, étude d'impact, et correspondant à l'évaluation des incidences Natura 2000 du projet global Cigéo a été mis à jour conformément aux éléments de réponse de l'Andra apportés à la recommandation R34.

Document de planification	Dispositions incompatibles	Modifications proposées	Observations de l'Ae
Scot du pays Barrois	Limitation à 50 ha de l'emprise des équipements structurants	Sortir Cigéo explicitement de cette règle	RAS
	Éviter le mitage hors de l'enveloppe urbaine		
	Identification du bois Lejuc comme réservoir de biodiversité d'intérêt local à classer en zone N ou A	Classement de la zone puits en 1AUYc au titre de projet d'intérêt général avec conditions environnementales et mesures ERC	L'Ae souligne dans l'avis la sous-évaluation de l'importance écologique du bois Lejuc comme réservoir et corridor de biodiversité. La recherche de solutions alternatives n'a pas été complète sur ce point.
	Identification du bois Lejuc comme réservoir de biodiversité d'intérêt national et régional à classer en zone N ou A		
	Identification du bois Lejuc comme corridor de biodiversité dans la trame verte et bleue à classer en zone N ou A	Permettre cette ouverture moyennant des mesures ERC	L'Ae souligne l'importance de ce corridor qui a été sous-estimée par le dossier
	Justifier que les zones constructibles ne nuisent pas au bon fonctionnement des exploitations agricoles et forestières	Compensation agricoles et forestières négociées avec les acteurs concernés	L'Ae souligne la nécessité d'évaluer les impacts environnementaux des mesures de compensation agricole et forestières.
	La carte identifiant la zone d'activité économique concernant Cigéo est, d'après le dossier, erronée en ce qu'elle est restreinte à la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie, ce qui exclut la descenderie.	Corriger la carte	L'Ae recommande de mieux justifier la position de la descenderie hors de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie
PLUI de la Haute-Saulx	Les affouillements et exhaussements de sol sont interdits ainsi que les nouvelles constructions hors activité déjà en place	Création des zones 1AUYc et UYcg et reclassement d'une partie du secteur N en Nc pour l'accueil de Cigéo notamment en matière d'eau et d'assainissement où seule la législation en vigueur doit être respectée	L'Ae recommande de quantifier les impacts potentiels et résiduels sur la ressource en eau et de préciser les mesures ERC, leurs objectifs de résultats et les protocoles de suivi. en particulier pour ce qui concerne la recharge de la nappe, la réduction de l'artificialisation et l'alimentation en eau potable
	Interdiction des constructions hors résidences démontables du chantier en zone UYc		
	Raccordement obligatoire de toute construction au réseau d'eau potable et d'assainissement		
	Interdiction de faire obstacle à l'écoulement des eaux pluviales		
PLU de Gondrecourt-le-Château	Limitation de constructibilité en zone A et N où l'installation terminale embranchée doit être construite	Emplacement réservé pour l'installation terminale embranchée de Cigéo excluant les zones inondables	RAS

Tableau 4 : Liste des principales modifications des documents de planification et commentaires correspondants de l'Ae.

ANNEXES

Annexe 1 Synthèse des options de sureté

2021

Synthèse des options de sûreté

Synthèse en réponse à l'avis
de l'Autorité environnementale

ANDRA
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

CG-TE-D-NTE-AMOA-ESE-0000-21-0347/A

Sommaire

1. Introduction 7
- *1.1 L'objet des options de sûreté 8*
- *1.2 Les options de sûreté résultant de boucles d'itérations sureté/conception/connaissances menées depuis 1991 11*
- *1.3 Les spécificités du centre de stockage Cigéo 14*
- 1.3.1 Le principe du stockage géologique profond 14
- 1.3.2 Le centre de stockage Cigéo 15
- 1.3.3 Les phases temporelles de développement du centre de stockage Cigéo 19
- 1.3.4 La réversibilité 21

2. La démarche globale de sûreté 23
- *2.1 La dangerosité des déchets 24*
- *2.2 L'objectif de protection à long terme après fermeture tout en maitrisant les risques en exploitation 27*
- *2.3 Les pratiques nationales et internationales 29*
- *2.4 Les fonctions de sûreté 31*
- 2.4.1 Les fonctions de sûreté long terme après fermeture 31
- 2.4.2 Les fonctions de sûreté en exploitation 34
- *2.5 Le socle de connaissances 35*
- 2.5.1 La connaissance des colis de déchets 35
- 2.5.2 La connaissance du site et de la couche du Callovo-Oxfordien 40
- *2.6 Les principes de conception 45*
- 2.6.1 La défense en profondeur 45
- 2.6.2 Les choix de conception 46

3. L'évaluation de sûreté en exploitation 59
- *3.1 Démarche générale 60*
- 3.1.1 Une démarche similaire aux autres INB 60
- 3.1.2 L'analyse de risques 60
- 3.1.3 L'analyse par situation de fonctionnement 62
- 3.1.4 Les évaluations de l'incidence sur l'homme 63
- *3.2 Les risques internes nucléaires 65*
- 3.2.1 Les risques liés à la dissémination de substances radioactives 65
- 3.2.2 Les risques liés aux rayonnements ionisants 68
- 3.2.3 Les risques liés à la criticité 71
- 3.2.4 Les risques liés à la thermique 72
- 3.2.5 Les risques liés aux gaz de radiolyse 74
- *3.3 Les risques d'agressions internes 76*
- 3.3.1 Les risques liés aux opérations de manutention 76
- 3.3.2 Les risques liés à l'incendie 82
- 3.3.3 Les risques liés à l'explosion 87
- 3.3.4 Les risques liés à une inondation interne 89
- 3.3.5 Les risques liés aux substances dangereuses non radioactives 90
- 3.3.6 Les risques liés à l'émission de projectiles 90
- 3.3.7 Les risques liés aux équipements sous pression 91
- 3.3.8 Les risques liés à la perte de l'alimentation électrique 92

- 3.3.9 Les risques liés à une perte de la ventilation 93
- 3.3.10 Les risques liés à la perte de la surveillance radiologique 94
- 3.3.11 Les risques liés à la perte du contrôle-commande 94
- 3.3.12 Les risques liés à la perte des fluides 95
- 3.3.13 Les risques liés au vieillissement des équipements et ouvrages 95
- 3.3.14 Les risques liés à la coactivité 96
- 3.3.15 Les risques liés aux opérations de retrait en exploitation 98
- *3.4 Les risques d'agressions externes 99*
- 3.4.2 Les risques liés à la chute d'avion 100
- 3.4.3 Les risques liés aux aléas naturels 100
- *3.5 Les situations retenues 104*
- *3.6 Les évaluations des conséquences de situations accidentelles 106*
- 3.6.1 L'accident de chute de colis de déchets radioactifs 106
- 3.6.2 L'accident lié à un incendie en alvéole de stockage à proximité de colis de déchets radioactifs MA-VL 107
- 3.6.3 La synthèse des conséquences 108
- *3.7 La gestion des situations accidentelles/post-accidentelles 110*
- *3.8 Les éléments importants pour la protection en exploitation 111*

4. L'évaluation de sûreté après fermeture 113
- *4.1 La démarche générale 114*
- 4.1.1 Une démarche encadrée par le guide n° 1 de l'ASN de 2008 et cohérente avec les pratiques internationales 116
- 4.1.2 Les scénarios de sûreté après fermeture 116
- 4.1.3 L'analyse des risques et incertitudes 117
- 4.1.4 L'évaluation des conséquences (traitement quantitatif des scénarios de sûreté après fermeture) 122
- *4.2 Les risques à long terme après fermeture 127*
- 4.2.1 Les risques internes au système de stockage 127
- 4.2.2 Les risques externes 128
- *4.3 Les incertitudes résiduelles de connaissance 130*
- 4.3.1 Les incertitudes résiduelles de connaissance des données d'entrée 130
- 4.3.2 Les incertitudes résiduelles « technologiques » 132
- 4.3.3 Les incertitudes résiduelles de connaissance portant sur l'évolution physico-chimique du système de stockage 134
- 4.3.4 Les incertitudes résiduelles de connaissance sur l'évolution à long terme du milieu géologique environnant 137
- *4.4 Les scénarios de sûreté après fermeture retenus 138*
- *4.5 Les évaluations quantitatives des scénarios de sûreté après fermeture retenus 140*
- 4.5.1 Les exutoires et biosphères retenus 140
- 4.5.2 Le scénario d'évolution normale 141
- 4.5.3 Les scénarios liés à des évolutions du stockage qui aurait dévié de son évolution normale 146
- 4.5.4 Les scénarios d'intrusion humaine involontaire dans la zone d'implantation des ouvrages souterrains, en cas d'oubli de l'existence du stockage 150
- *4.6 Les composants importants pour la protection à long terme 153*
- *4.7 Les activités de contrôles et surveillance mises en place dès la construction initiale en vue de la protection à long terme après fermeture 157*

Tables des illustrations 159

Références bibliographiques 161

Préambule

L'Andra a déposé le 3 août 2020 un dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo.

Dans ce dossier, et plus particulièrement l'étude d'impact, l'Andra a présenté les incidences sur la santé humaine lorsque le centre de stockage est en fonctionnement, c'est-à-dire dès la réception du premier colis de déchets radioactifs en vue de sa mise en alvéole de stockage, ainsi qu'après fermeture, c'est-à-dire une fois le centre de stockage fermé définitivement (opération que seule une loi peut autoriser).

Les incidences sont présentées dans les volumes IV « Évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences » et VI « Incidences sur la sûreté humaine » de la pièce 6 dite « Étude d'impact du projet global ». Les éléments sur les incidences présentés dans ce volume font référence à ceux présentés en détail dans le dossier d'options de sûreté « Cigéo 2015 » qui comprend en particulier les deux pièces suivantes :

- les options de sûreté en exploitation (CG-TE-D-NTEAMOA-SR1-0000-15-0060 (1)) ;
- les options de sûreté après fermeture (CG-TE-D-NTEAMOA-SR1-0000-15-0062 (2)).

Ces deux rapports sont disponibles dans leur intégralité à l'adresse suivante https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference.

Dans son avis référencé n° 2020-79 (3), l'Autorité environnementale souligne que le dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique de Cigéo fait référence au dossier d'options de sûreté qui constitue une étape importante dans la préparation du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base du centre de stockage, conformément à la réglementation (les options de sûreté sont soumises à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) conformément à l'article R. 593-14 du code de l'environnement).

L'Autorité environnementale considère également que « *l'étude d'impact doit reprendre les éléments principaux de ce dossier afin d'être autoportante et d'informer complètement le public* ».

En réponse à cette demande, les éléments techniques présentés ci-après constituent une synthèse des deux rapports relatifs aux options de sûreté en exploitation et après fermeture précités.

Après une présentation succincte de la place des options de sûreté de 2016 dans le processus d'autorisation du centre de stockage avec ses spécificités, la synthèse présente la démarche générale et les acquis depuis plus d'une vingtaine d'années sur lesquels se fondent ces options de sûreté. Elle développe en particulier la maitrise de la connaissance des colis et la place centrale du Callovo-Oxfordien, les principes de conception retenus, les méthodologies d'analyses de risques en exploitation et après fermeture et les résultats de ces analyses, puis les scénarios retenus et l'évaluation quantitative de leurs conséquences au stade des options de sûreté.

La présente synthèse se focalise sur les risques liés à la présence de la radioactivité dans les déchets de l'inventaire de référence pour les phases de fonctionnement et d'après fermeture long terme du centre de stockage Cigéo. Le dossier de demande d'autorisation de création comprendra, conformément à l'article R. 593-16 du code de l'environnement, une étude de maitrise des risques qui reprendra les éléments de cette synthèse mis à jour en lien avec les avancées en termes de définition de la conception et de démonstration de sûreté nécessaires à la constitution du dossier de demande d'autorisation de création. L'étude de maîtrise des risques complètera l'information du public en ce qui concerne les enjeux de sûreté.

1

Introduction

1.1 L'objet des options de sûreté 8
1.2 Les options de sûreté résultant de boucles d'itérations sureté/conception/connaissances menées depuis 1991 11
1.3 Les spécificités du centre de stockage Cigéo 14

1.1 L'objet des options de sûreté

» CADRE RÈGLEMENTAIRE

Selon l'article R. 593-14 du code de l'environnement, « *toute personne qui prévoit d'exploiter une installation nucléaire de base peut demander à l'Autorité de sûreté nucléaire, préalablement à l'engagement de la procédure d'autorisation de création, un avis sur tout ou partie des options qu'elle a retenues pour assurer la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1.*

L'autorité, par un avis rendu et publié dans les conditions et les formes qu'elle détermine, précise dans quelle mesure les options de sûreté présentées par le demandeur sont propres à prévenir ou limiter les risques pour les intérêts mentionnés à l'article L. 593-1, compte tenu des conditions techniques et économiques du moment. L'autorité peut définir les études et justifications complémentaires qui seraient nécessaires en vue d'une éventuelle demande d'autorisation de création. Elle peut fixer la durée de validité de son avis ».

En 2016, suite au débat public, l'Andra a transmis à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) l'ensemble des documents du dossier d'options de sûreté de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo (1, 2).

La transmission des options de sûreté pour instruction à l'ASN constitue une étape importante dans la préparation du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base du centre de stockage.

Les options de sûreté sont soumises à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui saisit l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et les groupes permanents d'experts. Après une instruction technique approfondie par les experts de l'IRSN et l'avis du groupe permanent d'experts sur la base du rapport d'avis de l'IRSN, l'ASN publie son avis sur les options de sûreté et précise dans sa lettre de suite ses demandes en vue de la demande d'autorisation de création. La figure 1-1 illustre le processus appliqué aux options de sûreté du centre de stockage Cigéo.

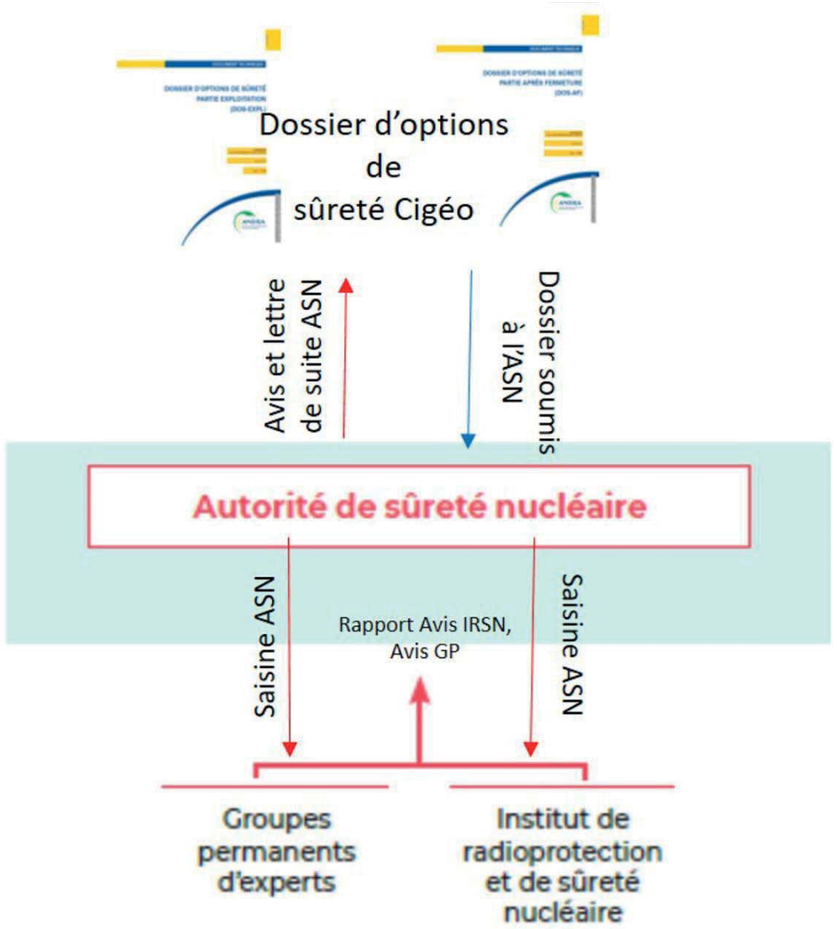


Figure 1-1 *Illustration du processus d'instruction d'un dossier d'options de sûreté*

Conformément au code de l'environnement, le dossier de demande d'autorisation de création (DAC), prendra en compte l'avis de l'ASN sur les options de sûreté de l'Andra (cf. Article R. 593-18).

Ce dossier fera l'objet d'un processus d'instruction dont notamment une instruction technique de l'ASN et de l'IRSN (cf. Figure 1-2), d'un avis de l'autorité environnementale et d'une enquête publique.

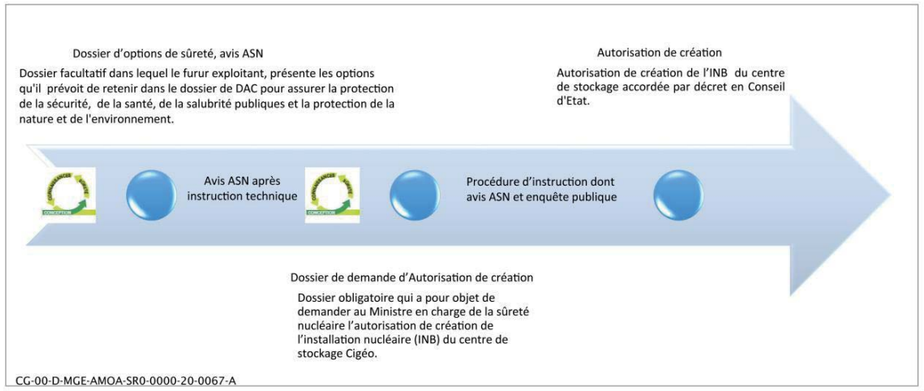


Figure 1-2 *Des options de sûreté à l'autorisation de création de l'installation nucléaire (INB) du centre de stockage Cigéo*

À l'issue du processus d'instruction selon les principes érigés dans le code de l'environnement, si l'autorisation de création de l'installation est délivrée, celle-ci le sera par décret en Conseil d'État après émission d'un second avis de l'ASN. Dans ce décret, des prescriptions relatives à la conception, à la construction et à l'exploitation de l'INB du centre de stockage Cigéo seront édictées.

Ensuite, et préalablement à la première prise en charge et mise en stockage de colis de déchets radioactifs, l'Andra constituera un dossier de demande d'autorisation de mise en service comprenant des compléments d'analyses relatives à la sûreté effectuées notamment sur la base du retour d'expérience de la construction initiale de l'INB du centre de stockage Cigéo et de l'approfondissement des études de conception. Ce dossier sera instruit par l'Autorité de sûreté nucléaire seule habilitée à accorder ou non l'autorisation de mise en service de l'INB du centre de stockage Cigéo.

LES OPTIONS DE SÛRETÉ DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

- Les options de sûreté constituent les grands choix qui guident la conception du centre de stockage Cigéo en matière de protection de l'homme et de l'environnement. Elles présentent :
  - ✓ les objectifs de protection, les principes et fonctions de sûreté en exploitation et après la fermeture du centre de stockage Cigéo qui guident la conception ;
  - ✓ les acquis de connaissance en particulier sur les colis de déchets radioactifs et la formation géologique dans laquelle ces colis seront stockés ;
  - ✓ les grands choix de conception indispensables pour conduire la future démonstration de sûreté qui sera instruite pour l'autorisation de création ;
  - ✓ les résultats préliminaires de l'analyse de sûreté :
    - les risques envisagés ;
    - la liste des situations de fonctionnement en exploitation et des scénarios après fermeture ;
    - les premières évaluations d'impact à l'homme en exploitation et après fermeture.

La constitution puis l'instruction des options de sûreté du centre de stockage Cigéo permettent de préparer la demande d'autorisation de création et en particulier de stabiliser les attendus de l'Autorité de sûreté nucléaire.

1.2 Les options de sûreté résultant de boucles d'itérations sureté/conception/connaissances menées depuis 1991

Les options de sûreté s'appuient sur des acquis de connaissances scientifiques et technologiques, des développements successifs de la conception, une démarche de sûreté et des évaluations associées dans le cadre d'un processus de développement progressif du projet de stockage en formation géologique démarré depuis les années 1990 (cf. Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (4)) et comprenant des boucles d'itérations successives entre conception, sûreté et connaissance.

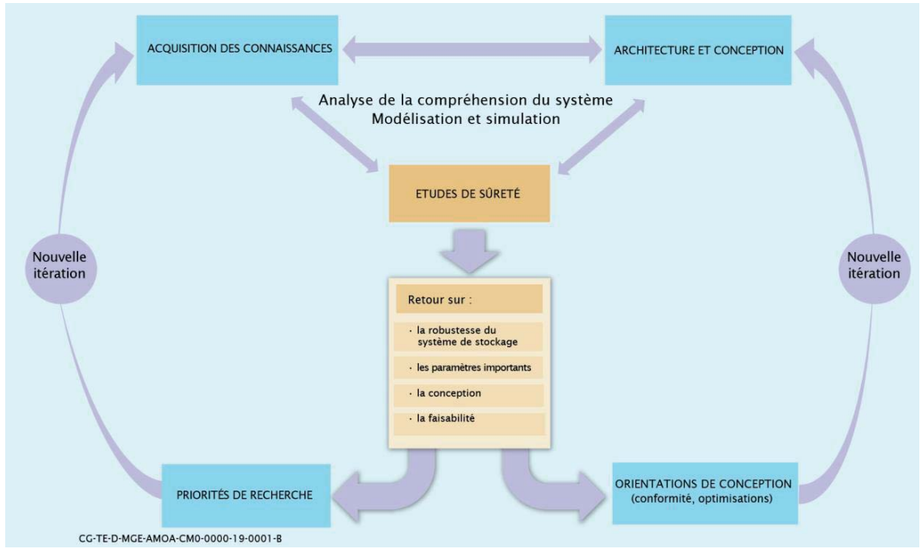


Figure 1-3 *Illustration du processus itératif reliant acquisition de connaissances, conception et sûreté*

En 1991 également, la règle fondamentale de sûreté n° III.2.f (RFS) relative au «*stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde* » publiée par l'Autorité de sûreté nucléaire (5) définit les objectifs qui doivent être retenus, dès les phases d'investigation du site et les phases de conception d'une installation de stockage, pour en assurer la sûreté « après la fermeture de l'installation de stockage », c'est-à-dire à partir du moment où toutes les voies d'accès à l'installation depuis la surface ont été scellées. La RFS III.2.f précise notamment qu'« *après la fermeture de l'installation de stockage, l'objectif fondamental du stockage est d'assurer la protection de la santé de l'homme et de l'environnement* ».

Aussi, l'Andra a accordé dès le début de la conception, une place centrale à cet objectif de protection à long terme en s'appuyant sur trois axes de recherche et de développement : l'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques ; la conception du stockage, la description (e.g. compréhension) du comportement du stockage et de son environnement géologique, les évaluations de sûreté.

Les boucles d'itérations sûreté/conception/connaissances scientifiques et technologiques menées par l'Andra, les évolutions des textes législatifs (loi n ° 91-1381 du 30 décembre 1991 (4), loi n ° 2006-739

du 28 juin 2006 (6), loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 (7)), les instructions successives des dossiers de l'Andra par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et les évaluations par la Commission nationale d'évaluation (CNE) se sont échelonnées ainsi sur une trentaine d'années, et ont permis :

- d'asseoir les fondamentaux nécessaires à la démonstration de sûreté d'un stockage en formation géologique profonde et en particulier à long terme après fermeture ;
- de préparer la création d'implantation et d'exploitation d'un laboratoire souterrain en évaluant les critères de choix de site et en procédant à une première évaluation de sûreté ;
- d'approfondir les connaissances scientifiques et technologiques et présenter la faisabilité du stockage sur la base des acquis de connaissances et en appliquant la démarche de sûreté, en réponse à la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (4) ;
- de préciser la zone d'implantation de recherche approfondie pour l'installation souterraine au sein de la zone où a été établie la faisabilité du stockage en 2005 et les zones d'implantation des installations de surface ;
- d'accompagner le développement progressif de la conception et ses évolutions en vue de la demande d'autorisation de création.

Chaque itération réalisée répond à un objectif visé en lien avec une étape clé du développement progressif du projet de stockage : définition des options initiales de conception, autorisation d'installation et d'exploitation du Laboratoire souterrain, préparation et démonstration de la faisabilité scientifique et technique du stockage et des premières options de conception et de sûreté associées, choix du site d'implantation, esquisse et options de sûreté.

Chaque itération a conduit à une évaluation de la sûreté, en fonctionnement et à long terme, en regard de l'état des connaissances scientifiques et technologiques, de la conception du stockage et de la description de son comportement dans le temps.

Pour chaque itération, l'Andra s'est attachée à vérifier notamment le respect des objectifs de sûreté et de protection fixés par la RFS.III.2.f de 1991 (5) puis le guide n° 1 de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 8 février 2008 (8).

Enfin, chaque itération s'est traduite par l'élaboration d'un dossier émis par l'Andra, qui a fait l'objet d'une instruction systématique menée par l'ASN et parfois d'une revue par des experts au niveau international.

DES ITÉRATIONS DE SÛRETÉ/CONCEPTION/CONNAISSANCES QUI SE SONT ÉCHELONNÉES

Les options de sûreté s'appuient sur un socle de connaissances scientifiques et technologiques acquis sur plus de vingt ans en accompagnant le développement progressif de la conception et de l'évaluation de la sûreté associée tant en exploitation qu'à long terme après fermeture.

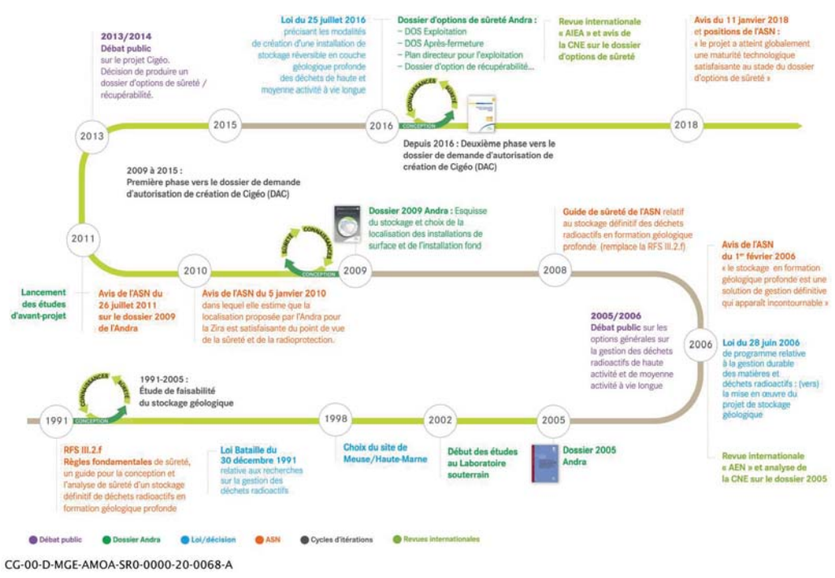


Figure 1-4 *Des itérations de sûreté/conception/connaissances qui se sont échelonnées depuis 1991*

1.3 Les spécificités du centre de stockage Cigéo

1.3.1 Le principe du stockage géologique profond

Les déchets de haute activité (HA) présentent un niveau de radioactivité de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme et contiennent des radionucléides à période longue. Ces déchets sont essentiellement des résidus, non valorisables, extraits du combustible nucléaire usé lors de son traitement, puis vitrifiés.

Les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) présentent un niveau de radioactivité de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme. Ils contiennent, aussi des quantités importantes de radionucléides à période longue. Ils se composent principalement des pièces et des composants métalliques ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires, des déchets de la maintenance des installations nucléaires et leur démantèlement et des résidus de décontamination

Les déchets HA et MA-VL pour lesquels le centre de stockage Cigéo est conçu ne peuvent donc pas être conservés en surface ou à proximité de la surface de façon pérenne et passive (c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire d'intervenir), compte tenu de leur forte dangerosité et de la très longue durée pendant laquelle cette dangerosité perdure.

Cigéo est un projet de centre de stockage en formation géologique profonde, conçu pour protéger durablement l'homme et l'environnement des risques générés par ce type de déchets radioactifs. Il répond à l'objectif d'une gestion durable des déchets les plus dangereux telle que définie dans le code de l'environnement (cf. Article L. 542-1 du code de l'environnement). Il répond plus particulièrement à un double objectif :

- éviter progressivement de mobiliser les générations futures pour gérer ces déchets, grâce au caractère passif[1] des dispositions de protection ;
- protéger durablement l'homme et l'environnement, en isolant les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et en limitant les transferts des radionucléides vers la surface.

» L'OBJECTIF FONDAMENTAL DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND EST DE PROTÉGER L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT DU DANGER QUE REPRÉSENTENT LES DÉCHETS LES PLUS RADIOACTIFS ET À VIE LONGUE

Le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte qu'après la fermeture définitive de l'installation, la sûreté est assurée de façon passive, c'est-à-dire que les personnes et l'environnement sont protégés des substances radioactives contenus dans les déchets radioactifs, sans plus nécessiter d'action humaine (ventilation, maintenance…).

Appliqué au centre de stockage Cigéo, les colis de déchets radioactifs HA et MA-VL sont placés dans des ouvrages construits dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, à une profondeur d'environ 500 m permettant d'isoler les déchets de l'homme et de l'environnement, pour tirer parti des propriétés de cette couche qui sont garanties sur de grandes échelles de temps.

[1] La mise en œuvre de dispositifs passifs est prévue par la directive européenne 2011/70/EURATOM (9), elle-même fondée sur les recommandations de sûreté nucléaire de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Considérant que « les déchets radioactifs (…) doivent être confinés et isolés durablement des êtres humains et de la biosphère » (considérant 21), la directive prescrit que les politiques nationales des pays membres en matière de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs reposent notamment sur le principe suivant : « le combustible usé et les déchets radioactifs sont gérés de manière sûre, y compris à long terme grâce à des dispositifs de sûreté passive » (Article n° 4-3-c).

L'Andra accorde ainsi une place centrale à l'objectif fondamental de protection à long terme en s'appuyant sur quatre axes :

- **l'acquisition de connaissances** scientifiques et technologiques (caractéristiques du milieu géologique, notamment la roche hôte, des déchets, et des colis de déchets, des composants ouvragés, des substances radioactives) afin de comprendre les phénomènes physiques et chimiques qui gouvernent leurs comportements et leur évolution, sur de très longues durées ;
- **la conception du stockage** en lien avec l'état des connaissances scientifiques et technologiques (conteneurs de stockage, ouvrages souterrains et leur organisation/implantation dans la roche hôte, architecture générale, opérations de manutention des colis, scellements dans les descenderies les puits et les galeries) afin de proposer une architecture de stockage une fois fermée définitivement répondant aux objectifs de sûreté à long terme ;
- **la description (e.g. compréhension) du comportement (phénoménologique) du stockage et de son environnement géologique** (notamment les interactions entre les déchets, les composants ouvragés et la couche du Callovo-Oxfordien et les évolutions géodynamiques) afin d'appréhender les évolutions thermique, mécanique, chimique et hydraulique ainsi que le relâchement des substances radioactives dans le temps et l'espace, à l'aide notamment de la modélisation et de la simulation numérique ;
- **les évaluations de sûreté après fermeture** réalisées sur la base d'itération sûreté/conception/connaissances.

1.3.2 Le centre de stockage Cigéo

Le centre de stockage Cigéo est situé dans la région Grand Est, au sein des départements de la Meuse et de la Haute-Marne (cf. Figure 1-5).).

Figure 1-5 Localisation du centre de stockage Cigéo dans l'Est de la France

» LES ZONES DU CENTRE DE STOCKAGE ACCUEILLANT DES OPÉRATIONS D'EXPLOITATION NUCLÉAIRE

- Une zone descenderie (ZD), principalement dédiée à la réception des colis de déchets radioactifs expédiés par les producteurs, à leur contrôle et à leur préparation avant transfert dans l'installation souterraine pour leur stockage. Les opérations d'exploitation nucléaire sont concentrées dans la partie centrale de la ZD dénommée « zone exploitation ».
- Une zone puits (ZP), dédiée aux installations de soutien aux activités souterraines : dans cette zone, il n'y a aucun colis de déchets radioactifs et les opérations d'exploitation nucléaires sont limitées à la maintenance des têtes de puits exploitation.
- Une zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), comprenant les accès depuis la surface, des quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs et des zones de soutien logistique (ZSL). Les parties de la ZIOS en exploitation nucléaire sont séparées physiquement des parties en travaux.

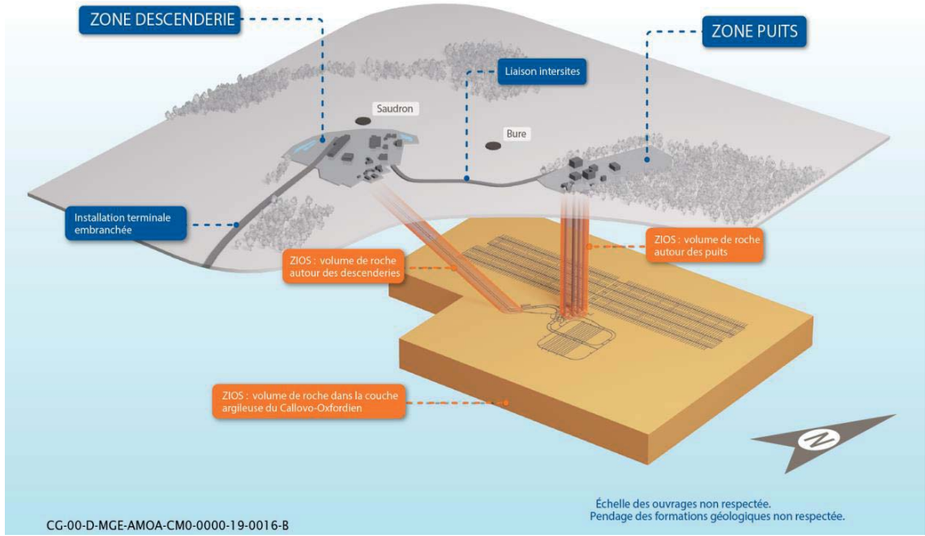


Figure 1-6 Schéma d'organisation de principe du centre de stockage Cigéo au stade des options de sûreté

1.3.2.1 La zone « descenderie »

Les convois de colis de déchets expédiés par les producteurs arrivent sur le terminal ferroviaire nucléaire en zone descenderie *via* le réseau ferré national et, sur les derniers kilomètres, par l'installation terminale embranchée.

À leur arrivée, après un premier contrôle administratif, les wagons chargés sont stationnés sur le terminal avant d'être dirigés vers les installations nucléaires de préparation des colis. Ce transfert se fait par un engin de manœuvre (locotracteur électrique) qui reste sur le centre de stockage Cigéo.

Le déchargement et le contrôle des emballages de transport contenant les colis de déchets sont effectués à l'intérieur de ces installations :

- un premier bâtiment dénommé « Exploitation phase 1 » (EP1), dédié au déchargement, au contrôle et à la préparation pour le stockage des colis de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et des colis de haute activité à vie longue dégageant peu de chaleur (HA0) ;
- un second, moins étendu, dénommé « Exploitation phase 2 » (EP2), dédié au déchargement, au contrôle et à la préparation pour le stockage des colis HA dits « thermiques » (HA1/HA2) qui ne seraient pris en charge qu'à l'horizon 2070-2080. Sa construction, assujettie à l'obtention des autorisations administratives adéquates, n'est envisagée qu'après plusieurs décennies d'exploitation.

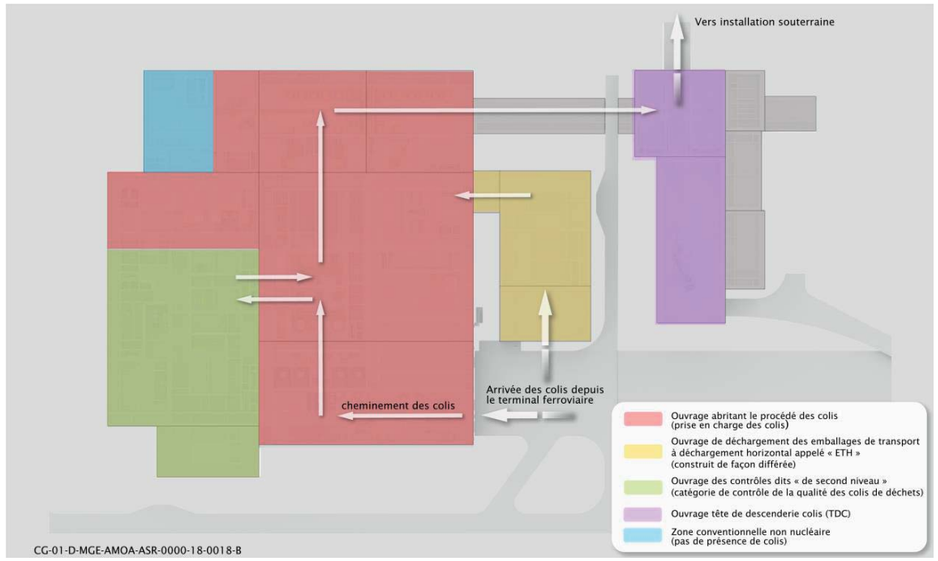


Figure 1-7 *Schéma de principe de l'organisation spatiale du bâtiment nucléaire EP1 et de la tête de descenderie colis*

Les bâtiments nucléaires de la zone « descenderie » assurent essentiellement des fonctions de réception, de contrôle et de transfert de colis de déchets :

- réception des colis de déchets en emballage de transport ;
- décharger les colis primaires de déchets ;
- constituer les colis de stockage ;
- transférer les colis de stockage vers la mise en hotte ;
- assurer la mise en hotte des colis de stockage ;
- effectuer des contrôles sur les colis à chaque étape.

1.3.2.2 La zone d'implantation des ouvrages souterrains

La zone d'implantation des ouvrages souterrains comprend à terminaison :

- deux descenderies et cinq puits qui relient respectivement la zone descenderie et la zone puits à la zone de soutien logistique exploitation et à la zone de soutien logistique travaux :

  - ✓ la descenderie dite « descenderie colis » permet le transfert des colis de déchets de la surface au fond pour leur mise en stockage. Ce transfert se fait au moyen d'un funiculaire ;
  - ✓ la descenderie dite « descenderie de service », dédiée aux fonctions d'exploitation permet de réaliser les transferts liés à la maintenance, à l'acheminement de matériels et de matériaux, à l'évacuation des personnels et d'accès aux secours pour les interventions d'urgence ;
  - ✓ le puits permettant l'extraction d'air de la zone souterraine en travaux ;
  - ✓ le puits assurant l'apport d'air frais et le transfert du personnel vers la zone souterraine en travaux ;
  - ✓ le puits de transfert des matériels et matériaux ;
  - ✓ le puits permettant l'extraction d'air de la zone souterraine en exploitation ;
  - ✓ le puits assurant l'apport d'air frais et le transfert du personnel, des équipements, matériels et matériaux vers la zone souterraine en exploitation.
- une zone de soutien logistique (ZSL) exploitation qui supporte les activités de la zone souterraine en exploitation et par laquelle transitent les colis de déchets radioactifs ;
- une zone de soutien logistique (ZSL) travaux qui supporte les activités de la zone souterraine en travaux et par laquelle transitent les équipements et les matériaux pour la construction ;
- des zones de stockage comprenant :
  - ✓ un quartier pilote HA ;
  - ✓ un quartier de stockage MA-VL ;
  - ✓ un quartier de stockage HA.

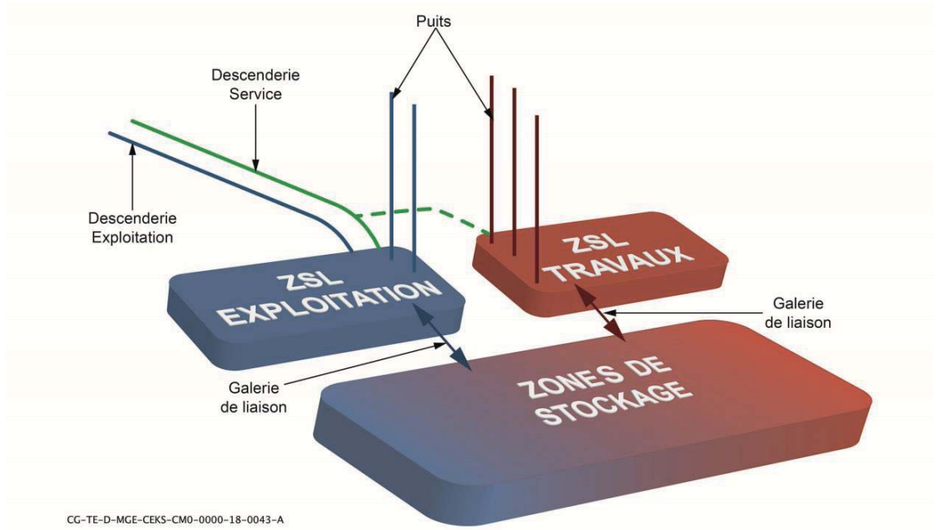


Figure 1-8 *Illustration du principe de séparation des différentes zones et liaisons surface-fond (dimensions et proportions des zones non représentatives)*

Les puits et descenderies assurent une continuité entre la zone de descenderie et la zone puits.

Les puits et descenderies sont remblayés et scellés[2] lors de la fermeture définitive[3].

Les ouvrages souterrains sont des ouvrages à accès limité comparativement aux ouvrages en surface. Ce sont des ouvrages de grande longueur. Le déploiement des ouvrages se fait de manière progressive.

La zone de stockage est constituée de trois quartiers suivant les caractéristiques des déchets HA et MA-VL.

1.3.2.1 La zone « puits »

La zone puits comprend les émergences des cinq puits :

- les deux puits pour l'exploitation émergent en zone exploitation de la zone puits et desservent la zone de soutien logistique exploitation ;
- les trois puits pour les travaux, émergent en zone puits travaux/verses de la zone puits et desservent la zone de soutien logistique travaux.

La zone puits comprend également une zone de dépôt des déblais d'excavation du Callovo-Oxfordien, appelée zone puits travaux et verses, qui n'accueille aucune opération d'exploitation nucléaire. Elle accueille notamment les déblais qui sont conservés en vue de la fermeture du stockage.

L'émergence du puits d'extraction d'air de la zone souterraine en exploitation est l'émissaire de rejet potentiel d'aérosols radioactifs atmosphériques de la zone de stockage à l'extérieur du centre de stockage Cigéo.

1.3.3 Les phases temporelles de développement du centre de stockage Cigéo

Le développement du centre de stockage Cigéo est organisé en plusieurs phases successives.

Le développement du centre de stockage après l'obtention du décret d'autorisation de création est envisagé selon les phases temporelles successives suivantes :

- **la phase de construction initiale** (une fois l'autorisation de création promulguée par décret) : une première partie, ou première « tranche[4] », de l'installation est réalisée. Elle porte principalement sur la construction des bâtiments et ouvrages de surface liés à l'exploitation de l'installation nucléaire de surface, les liaisons surface-fond, ainsi que les ouvrages souterrains permettant de recevoir de premiers colis de déchets ;
- **la phase de fonctionnement** qui se déroule pendant une centaine d'années et au cours de laquelle ont lieu simultanément des opérations de réception et de mise en stockage de colis et des travaux d'extension de l'installation souterraine, par tranches successives, afin de poursuivre la réception des colis de déchets radioactifs. L'exploitation nucléaire démarre après l'autorisation de mise en service délivrée par l'ASN (réception de premiers colis de déchets radioactifs utilisés pour des essais actifs) ;
- **la phase de démantèlement et de fermeture sous réserve d'autorisation**. À ce stade, le plan directeur pour l'exploitation de Cigéo envisage la fermeture définitive à l'horizon de 2150. Auparavant l'exploitation du centre de stockage Cigéo aura suivi un développement progressif offrant notamment la possibilité aux générations futures d'intégrer les pistes d'optimisations qui seront rendues possibles par les progrès scientifiques et techniques et par le retour d'expérience de l'exploitation dans un objectif d'amélioration continue ;

[2] Conformément au Guide de sûreté n° 1 de 2008 (8) relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde.
[3] Seule une loi (L. 542-10-1 du code de l'environnement), peut autoriser la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo.
[4] Une tranche correspond à un ensemble de bâtiments de surface et/ou d'ouvrages souterrains construits en engageant une tranche d'investissement, c'est-à-dire une partie du coût global de possession.

- **la phase de surveillance puis la phase post-surveillance** sous réserve de son autorisation par une loi, après la fermeture définitive de Cigéo et la déconstruction des installations de surface. **Les phases de surveillance et de post-surveillance constituent la période long terme après-fermeture**.

Le code de l'environnement prévoit une phase industrielle pilote (Phipil) pour le centre de stockage Cigéo.

L'Andra propose que cette phase particulière recouvre la phase de construction initiale et les premières années de la phase de fonctionnement. Cette proposition fait l'objet de concertations (10) et pourra naturellement être modifiée sur la base des échanges avec les parties prenantes et le public.

Les différentes phases temporelles successives sont présentées dans la figure ci-après.

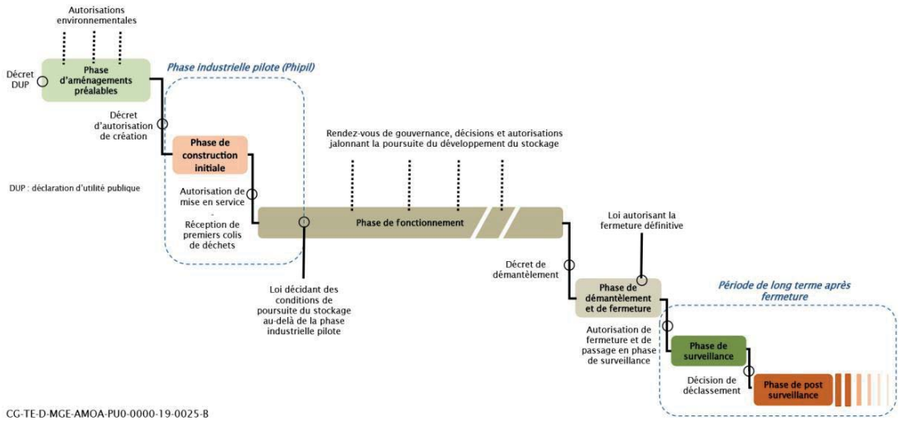


Figure 1-9 Schéma des principales phases temporelles de développement du centre de stockage Cigéo

» LA PÉRIODE DE LONG TERME APRÈS FERMETURE

Après fermeture, à long terme, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée, même si elle couvre plusieurs siècles.

En s'appuyant sur les propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien, le centre de stockage Cigéo est conçu pour être fermé à la fin de son fonctionnement afin de protéger durablement les personnes et l'environnement sans plus nécessiter d'actions. La sûreté sera alors réalisée de manière passive.

L'évaluation de la sûreté long terme après fermeture est spécifique au stockage en formation géologique profonde par rapport à d'autres installations nucléaires, comme un réacteur électronucléaire. Cette période de long terme après fermeture est prise en compte dès la conception initiale (cf. Chapitre 2.2) et tout au long du développement progressif du centre de stockage Cigéo.

1.3.4 La réversibilité

LA RÉVERSIBILITÉ

L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement précise que « *La réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. La réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation d'un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique. Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.* »

Sur le plan technique, la réversibilité s'organise autour des quatre enjeux suivants :

- la **progressivité de la construction du centre de stockage** qui correspond à un enchaînement prudent d'opérations de construction et de mises en service successives de parties du centre de stockage, sur toute la durée de son fonctionnement. Elle permet principalement d'accélérer, de retarder ou de modifier l'ordre de construction et de mise en service de ces extensions. Elle offre la possibilité aux générations futures d'adapter les ouvrages qui seront construits pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage à d'éventuelles évolutions d'inventaire ;
- la **flexibilité du fonctionnement du centre de stockage** qui correspond à a capacité de ce dernier, une fois construit, à absorber des variations de son programme industriel (chronique de réception des colis, flux de réception, date d'obturation d'alvéoles ou de quartiers de stockage), sans modification des infrastructures ou des équipements existants et sans construction d'ouvrages nouveaux. Elle offre la possibilité aux générations futures de décaler ou d'accélérer (dans certaines limites) les flux de colis de déchets reçus et de stocker des colis dans une gamme de formes, de dimensions et de masses variables ;
- l'**adaptabilité des installations du centre de stockage** qui correspond à la capacité à les modifier pour prendre en compte de nouvelles hypothèses de dimensionnement. Elle permet principalement, sous réserve des autorisations préalables, d'adapter le centre de stockage à d'éventuelles modifications de l'inventaire des déchets pour lesquels il est conçu. En effet, tout au long du fonctionnement de Cigéo, des décisions prises dans le cadre des politiques nationales de gestion des déchets pourraient orienter vers le centre de stockage Cigéo certains déchets radioactifs non prévus initialement. En fonction des volumes et des types de déchets concernés, leur stockage présenterait des enjeux techniques différents pour Cigéo, allant de simples ajustements de sa conception et de son exploitation, jusqu'à des modifications notables de son architecture, par exemple pour la prise en charge de combustibles usés. À titre de précaution, depuis les premières étapes du projet dans les années 2000, l'Andra étudie la faisabilité du stockage d'une partie des déchets FA-VL et de combustibles usés dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien ;
- la **récupérabilité** qui correspond à la capacité à retirer du centre de stockage des colis qui y ont été stockés. Le centre de stockage Cigéo est conçu pour que, sur toute la période allant de sa mise en service jusqu'à sa fermeture définitive, les colis stockés puissent en être retirés. Le procédé de retrait s'effectue en sens inverse depuis l'alvéole jusqu'à la surface. Le centre de stockage Cigéo offre de fait, pendant plus de 100 ans, aux générations futures, des fonctions analogues à celles d'une installation d'entreposage centralisé (surveillance, retrait éventuel, réexpédition éventuelle). Le fait de retirer du stockage des colis de déchets qui y avaient initialement été stockés, sans l'intention de les en retirer, implique une réorientation de la décision initiale. La mise en œuvre de la récupérabilité serait donc liée à l'émergence d'une finalité procurant un avantage par rapport à la décision initiale, y compris en termes de sûreté, en fonctionnement ou après-fermeture. Elle ne peut donc être exercée qu'associée à d'autres décisions, prises dans le cadre de la gestion globale des déchets radioactifs.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
Introduction

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour offrir des choix aux générations suivantes en matière de gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL et pour ne pas les enfermer par des choix de conception faits au lancement du projet.

Le stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde s'effectue « dans le respect du principe de réversibilité[5] ».

LA RÉVERSIBILITÉ DANS LE GUIDE DE L'ASN N° 1 DE 2008[6]

Le guide de l'ASN n° 1 de 2008 relatif « au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde » (8) mentionne que :

- « *La réversibilité du stockage suppose des moyens d'exploitation adaptés, ainsi que des moyens de surveillance de l'installation* » ;
- « *Les dispositions prises pour assurer la réversibilité du stockage ne doivent pas compromettre la sûreté en exploitation et la sûreté après fermeture de l'installation de stockage* ».

[5] Selon l'article L542-1-1 du code de l'environnement

[6] Le guide n° 1 de l'ASN de 2008 est une mise à jour de la règle fondamentale de sûreté n° III.2.f (RFS) de 1991 (5) et relative au « stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde ». Cette mise à jour fait suite à la loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 (6), et intègre notamment le volet de la réversibilité et les évolutions de doctrine des publications des instances internationales concernées (AIEA, CIPR…).

2

La démarche globale de sûreté

2.1 La dangerosité des déchets 24
2.2 L'objectif de protection à long terme après fermeture tout en maitrisant les risques en exploitation 27
2.3 Les pratiques nationales et internationales 29
2.4 Les fonctions de sûreté 31
2.5 Le socle de connaissances 35
2.6 Les principes de conception 45

2.1 La dangerosité des déchets

LA DANGEROSITÉ DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Les éléments radioactifs émettent des rayonnements dont la dangerosité dépend de la nature et du niveau de radioactivité. L'évaluation des effets sur l'homme se fait à l'échelle de sa vie entière, via le calcul d'une « dose efficace engagée », exprimée en Sievert (Sv).

Le niveau de radioactivité des déchets HA et MA-VL leur confère une forte dangerosité radiologique et présente les risques suivants :

- **l'irradiation ou exposition externe** lorsqu'une personne se trouve exposée à des rayonnements émis par une source radioactive située à l'extérieur du corps. Dans ce cas, l'exposition est réduite, voire cesse, dès lors que la source de radioactivité est éloignée de la personne ou si un écran est interposé entre la personne et la source ;
- **la contamination ou exposition interne** lorsqu'une personne est exposée à des rayonnements émis par des radionucléides qui ont pénétré à l'intérieur de son organisme. Ceci peut se produire par inhalation de substances radioactives présentes dans l'air, par ingestion d'aliments contenant des substances radioactives ou par transfert à travers la peau. Lors d'une contamination, l'exposition aux substances radioactives se poursuit tant que la source est à l'intérieur ou au contact du corps.

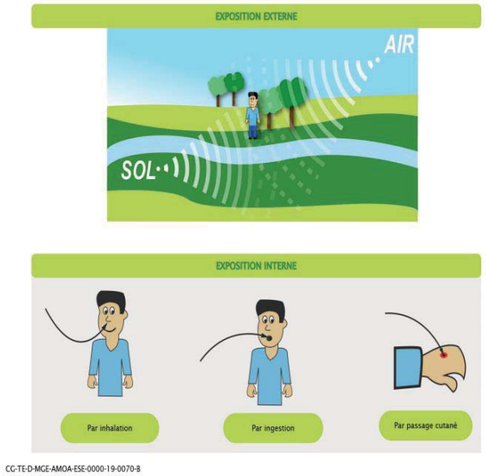


Figure 2-1 Illustration des types d'exposition à la radioactivité

Les effets des rayonnements ionisants sur l'homme sont évalués en tenant compte des différents processus en jeu.

Un individu qui se placerait au voisinage immédiat de déchets radioactifs HA, sans protection, aurait une espérance de vie de quelques minutes du fait de leur rayonnement. De par leurs natures et leurs concentrations nettement plus faibles en radionucléides, les déchets radioactifs MA-VL sont en général moins irradiants, mais ils restent dangereux.

Les déchets HA et MA-VL sont également dangereux dans le cas où des personnes inhaleraient des poussières contaminées qui seraient émises à proximité des colis si un accident entraînait une perte de

confinement. Une ingestion ou une inhalation de particules de déchets HA et MA-VL pourrait entraîner une contamination interne et une irradiation de l'organisme potentiellement très grave pour la santé.

La concentration élevée des actinides mineurs dans les déchets HA et MA-VL[7] les rend particulièrement dangereux en cas d'exposition interne. En effet, les actinides, qui sont des émetteurs de particules alpha, ont en cas d'ingestion ou d'inhalation des effets sanitaires potentiellement très graves.

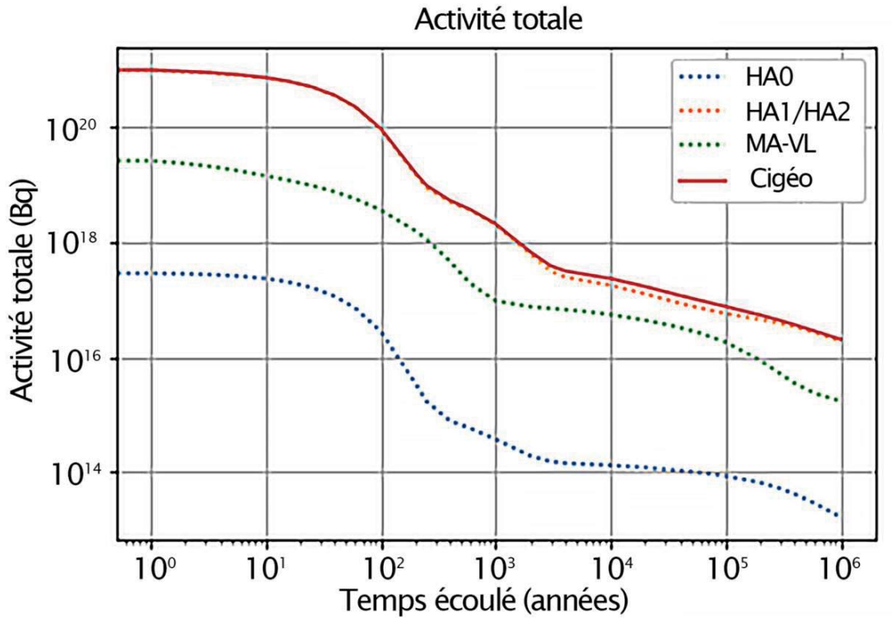
Le conditionnement des déchets radioactifs et notamment leur vitrification a pour effet notable de limiter très fortement l'émission de particules et de poussières (aérosols) en cas d'accident.

En cas de dispersion dans l'environnement, l'ingestion ou l'inhalation de particules ou de poussières émises par les déchets HA et MA-VL comporte des risques. Les phénomènes de dispersion, de dilution, de déposition, d'intégration partielle dans la chaîne alimentaire et de métabolisation de la radioactivité tendent toutefois à réduire les risques d'exposition. Les mécanismes d'estimation des conséquences radiologiques font alors appel à des modèles spécifiques en fonction des voies d'exposition.

Même si la radioactivité des déchets HA et MA-VL décroit dans le temps, les échelles de temps associées à leur dangerosité sont très longues. En ordre de grandeur, ce n'est qu'au bout de plusieurs centaines de milliers d'années que leur radioactivité approchera la radioactivité initiale des déchets de faible activité qui peuvent être stockés en surface ou à faible profondeur. Les déchets HA et MA-VL contiennent plus de 99 % de la radioactivité totale de l'ensemble des déchets radioactifs. Ils concentrent cette radioactivité dans un volume ne représentant qu'un peu plus de 3 % du volume total de l'ensemble des déchets radioactifs.

[7] À titre d'exemple de teneur en actinides mineurs dans les déchets radioactifs, l'américium 241 (^{241}Am) est présent à raison d'environ 10^{14} becquerels par colis de déchets vitrifiés et d'environ 10^{11} becquerels par colis MA-VL de déchets compactés de type CSD-C.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
La démarche globale de sûreté



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR0-0000-21-0012-B

Figure 2-2 *Décroissance de la radioactivité dans le temps des déchets radioactifs des déchets HA0, HA1/HA2 et MA-VL*

LE CONFINEMENT DE LA RADIOACTIVITÉ

- En exploitation, pour se protéger des risques d'irradiation, de contamination et d'ingestion, le confinement de la radioactivité est assuré principalement par les colis de déchets.
- Après la fermeture, le confinement de la radioactivité assuré par les colis ne peut pas être considéré pérenne, la couche de Callovo-Oxfordien assure principalement le confinement à l'échelle des temps géologiques. Il s'entend par le piégeage des éléments radioactifs, par exemple dans le stockage, et/ou la limitation de leur migration dans le temps et l'espace, notamment dans la couche du Callovo-Oxfordien.

2.2 L'objectif de protection à long terme après fermeture tout en maitrisant les risques en exploitation

Comme indiqué au chapitre 1, l'objectif de protection à long terme après fermeture est pris en compte dès la conception initiale et tout au long du développement progressif du centre de stockage Cigéo.

La conception du centre de stockage Cigéo répond donc à la fois à des fonctions de sûreté en exploitation et après fermeture et aux exigences associées (cf. Chapitre 2.4).

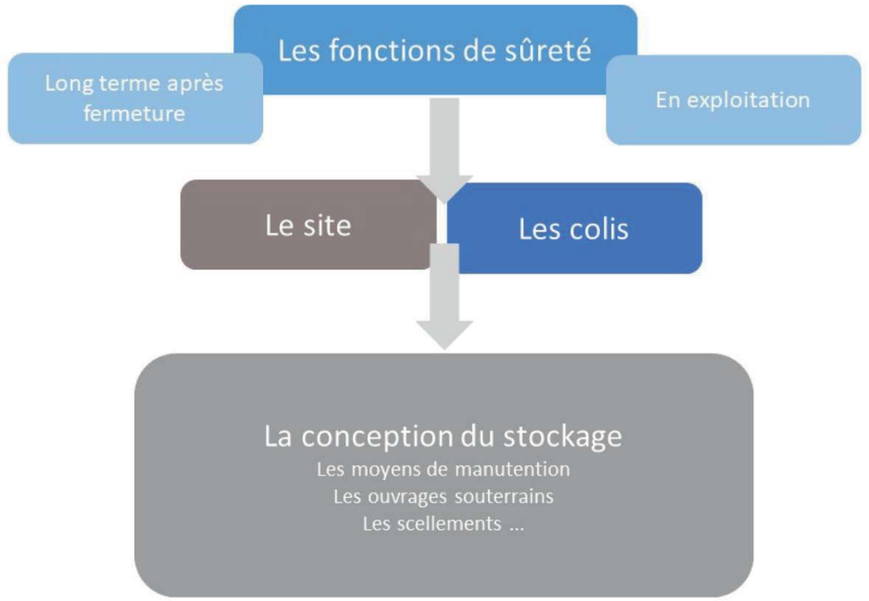
La conception est analysée en regard de la capacité à satisfaire les fonctions de sûreté et à maitriser les risques en exploitation (cf. Chapitre 3) et après fermeture (cf. Chapitre 4). Ainsi :

- les bâtiments et ouvrages nucléaires en surface, ainsi que les moyens de manutention sont conçus pour maitriser les risques en exploitation ;
- les ouvrages souterrains sont conçus pour maitriser les risques en exploitation et après fermeture :
  - ✓ les solutions techniques des composants ouvragés du système de stockage (conteneur de colis de déchets HA, scellements, organisation des ouvrages dans l'architecture de l'installation souterraine) issues de l'analyse des risques après fermeture reposent sur l'analyse de leur compatibilité avec une exploitation sûre du centre de stockage Cigéo ;
  - ✓ les dispositions prises pour maitriser les risques en exploitation doivent préserver les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien.

La conception du centre de stockage Cigéo (bâtiments, ouvrages, équipements), son fonctionnement (opérations de manutention) et son comportement dans le temps une fois les ouvrages souterrains fermés définitivement intègrent la connaissance :

- des colis de déchets HA et MA-VL qui sont les objets à stocker, c'est-à-dire leurs caractéristiques intrinsèques (nature, géométrie, inventaire en radionucléides, thermique...) et leur comportement sur de longues échelles de temps ;

- de la couche du Callovo-Oxfordien, c'est-à-dire ses caractéristiques (géologique, chimique, hydraulique, mécanique, thermique...) et son comportement sur de longues échelles de temps.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR0-0000-21-0013-A

Figure 2-3 Illustration des liens sûreté-conception-connaissances

La minimisation de l'incidence à long terme de la présence du stockage de déchets radioactifs constitue un objectif clé dans la conception du centre de stockage. Celui-ci a été intégré dès le démarrage du projet via des itérations sureté/conception/connaissances scientifiques et technologiques périodiques permettant de vérifier, à chaque étape, de manière intégrée, la performance des composants (naturel et ouvragés) du stockage vis-à-vis des fonctions de sûreté qui leur sont assignées.

La prise en compte de l'objectif de protection à long terme de manière passive vise également à identifier les activités de surveillance à mettre en place dès la construction du stockage en lien avec les fonctions de sûreté après fermeture (cf. Chapitre 4).

La démarche globale qui relie la sûreté en exploitation et la sûreté après fermeture permet de gérer les avancées de connaissances et le retour d'expérience de l'exploitation de manière intégrée. En effet, l'opportunité de retenir de nouvelles solutions techniques par exemple pour la conception du système de stockage est analysée sous l'angle de leur compatibilité avec une exploitation sûre de l'installation et du respect des exigences de sûreté après fermeture.

DEUX DÉMARCHES DE SÛRETÉ MENÉES EN PARALLÈLE ET DE MANIÈRE INTÉGRÉE

- ***En exploitation,*** la démarche de sûreté s'apparente à une démarche classique appliquée par les autres installations nucléaires. Les règles et pratiques sont communes à toute installation nucléaire de base (règles fondamentales de sûreté « RFS », guides de sûreté...). Leur mise en œuvre intègre les spécificités en particulier de l'installation souterraine (co-activité entre travaux et exploitation nucléaire en souterrain, longueur des ouvrages, durée du fonctionnement d'une centaine d'année...) et de la réversibilité.
- ***Après fermeture***, la démarche de sûreté est propre au stockage et destinée à garantir la sûreté à long terme une fois l'installation de stockage fermée définitivement. Le guide de l'ASN n° 1 de 2008 (8) spécifique au stockage en formation géologique profonde fixe les objectifs qui doivent être retenus, notamment :
  - ✓ les objectifs de protection de la santé des personnes et de l'environnement ;
  - ✓ les principes de sûreté et les bases de conception de l'installation de stockage liées à la sûreté ;
  - ✓ la méthode de démonstration de la sûreté du stockage.

2.3 Les pratiques nationales et internationales

La démarche de sûreté retenue par l'Andra suit les textes relatifs à la sûreté (standards, documents techniques rassemblant des pratiques), émis par les organismes internationaux (AIEA[8], AEN[9], CIPR[10]) qui fixent des principes et permettent le dialogue avec la communauté internationale, en établissant des références communes à tous.

L'Andra se réfère également aux textes en vigueur de la CIPR pour les questions relatives à la protection radiologique qui fixe notamment les limites et contraintes en matière de dose.

L'Andra est également fortement impliquée dans des coopérations internationales, notamment avec ses homologues étrangers, au travers de collaborations bilatérales ou multilatérales (collaborations entre l'Andra et Nagra par exemple...), de projets européens (cf. Euratom) ou d'instances internationales (Post closure safety case (11), workshop scenario, projet AEN MeSA, projet AIEA BIOMASS (12)). Cela permet aux agences de disposer en commun d'une base éprouvée de connaissances, de méthodes et d'analyses ainsi que partager les retours d'expériences.

L'Andra échange également avec les exploitants nucléaires sur les référentiels et leur mise en œuvre.

Par ailleurs, l'Andra fait appel à des compétences nombreuses et de nature diverses et complémentaires. Celles-ci couvrent ainsi un vaste champ de domaines qui sont au cœur de la conception, la réalisation, l'exploitation et la sûreté du stockage géologique : par exemple les géosciences (géologie, sédimentologie structurale, géo-mécanique, géochimie, tectonique/sismicité, hydrogéologie...), la radiochimie, les sciences des matériaux, les sciences du climat, les travaux souterrains, le génie civil, le génie nucléaire, les mathématiques appliquées, la simulation numérique, la métrologie, la science des données, la radioprotection, la sécurité incendie...

L'Andra s'adresse ainsi à des organismes divers (centres de recherche, universités, établissements publics à caractères scientifique et technologique, ingénieries, grands groupes de la filière nucléaire, des travaux publics ou des travaux souterrains, institutions/associations professionnelles...) dont la compétence dans un domaine donné est reconnue. Cela permet à l'Andra de disposer d'une base de connaissances et d'une analyse solide dans chaque domaine mobilisé. Par ailleurs, en regard du caractère pluridisciplinaire des sujets traités, l'Andra établit le croisement entre les différentes compétences et

[8] AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique
[9] AEN : Agence de l'énergie nucléaire
[10] CIPR : Commission internationale de la radioprotection

domaines afférents, afin notamment de s'assurer de la cohérence d'ensemble, notamment en termes d'analyse de risques et de sûreté.

En termes de gouvernance interne, l'Andra s'appuie sur différentes instances indépendantes et constituées d'experts reconnus dans leur domaine, en particulier un conseil scientifique et des comités techniques spécialisés, comme le comité industriel, le comité des travaux souterrains, le comité des expérimentations dans le Laboratoire souterrain, ou le comité sûreté. Ces instances contribuent au système de revues internes dédiées à l'analyse des données, modèles et choix de sûreté à retenir pour les évaluations de sûreté. Ces revues permettent de valider les choix et leurs justifications.

Le Conseil scientifique de l'Andra, nommé par décret par les tutelles de l'Agence, est chargé d'émettre des avis et recommandations sur les priorités des recherches menées par l'Andra et d'en évaluer les résultats, notamment en regard des enjeux d'acquisition ou d'utilisation des connaissances scientifiques et technologiques pour la conception et la sûreté du système de stockage. À ce titre, le Conseil scientifique a examiné systématiquement tout ou parties des dossiers antérieurs et à chaque itération de sûreté/conception/connaissances.

En complément, l'Andra s'est également attachée à soumettre les résultats des travaux de conception et de sûreté à une évaluation indépendante par un comité faisant intervenir des experts externes ou par des revues de conception à chaque étape clé du développement du projet Cigéo (esquisse, avant-projet...) faisant également appel à des experts externes.

Enfin, plusieurs instructions, revues ou équivalents externes, ont été menés :

- depuis 1991, les différents dossiers afférents au développement du projet Cigéo sont soumis à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui a émis des avis et recommandations, notamment pour le dossier d'options de sûreté établi par l'Andra en 2016 en vue de la demande d'autorisation. Ses avis sont établis sur la base d'un travail d'évaluation mené par l'Institut de radioprotection et de sûreté (IRSN) et soumis à des groupes permanents d'experts (maillon important de l'organisation de la sûreté nucléaire en France, un groupe permanent d'experts est une instance constituée d'experts nommés en raison de leurs compétences et de leur expérience professionnelle. Ils sont issus des milieux universitaires et associatifs mais aussi des exploitants concernés par les sujets traités et de l'IRSN). L'Autorité de sûreté effectue également des « visites de surveillance » notamment sur le Centre de Meuse/Haute-Marne au cours desquelles elle porte une appréciation sur la qualité de travaux en cours, en particulier dans le Laboratoire souterrain ;
- instaurée par la loi du 30 décembre 1991 (4) puis celle de 2006 (13), la commission nationale d'évaluation (CNE) a pour mission d'évaluer la qualité des travaux de l'Andra et produit un rapport annuel dans lequel elle émet un avis sur ces travaux. Ses avis et recommandations constituent des données d'entrées pour affiner les priorités du programme de recherche et de manière général les travaux de conception et d'évaluation de sûreté. La CNE rend compte à l'office parlementaire des choix scientifiques et technologiques (OPCST) ;
- afin de vérifier la cohérence au regard des pratiques internationales, à la demande des ministères de tutelle de l'Andra, deux revues par les pairs ont été organisées respectivement en 2002 et 2005 par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE.

Enfin, le comité local d'information et de suivi (CLIS) du Laboratoire de Bureau aussi mandaté en propre des expertises, comme sur la géothermie, ou la revue de grands dossiers de l'Andra par des organismes indépendants, comme l'IEER pour le dossier 2005 et le dossier 2009 de l'Andra (https://clis-bure.fr).

2.4 Les fonctions de sûreté

2.4.1 Les fonctions de sûreté long terme après fermeture

Afin de répondre à l'objectif fondamental de protection des personnes et l'environnement contre les risques liés à la radioactivité des déchets, le système de stockage après fermeture consiste à isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines sur le long terme et limiter la migration jusqu'à la surface des radionucléides contenus dans les déchets.

» LE SYSTÈME DE STOCKAGE APRÈS FERMETURE

Le système de stockage après fermeture comprend la roche hôte et des composants ouvragés complémentaires :

- la couche de Callovo-Oxfordien ;
- les colis de stockage de déchets ;
- les ouvrages souterrains remblayés et scellés.

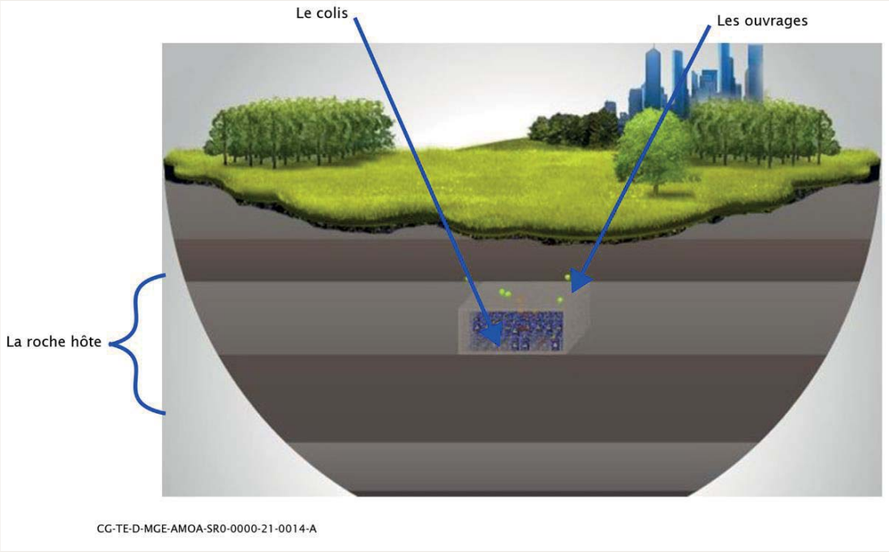


Figure 2-4 Illustration du système de stockage après fermeture

Ainsi, l'Andra identifie et organise comme suit les fonctions de sûreté du système de stockage Cigéo en après fermeture :

La première fonction fondamentale de sûreté après fermeture consiste à **isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines**.

Le fait que les déchets soient « isolés » de la surface signifie qu'il existe entre ces deux éléments une séparation physique, un éloignement visant à prémunir l'homme et l'environnement des dangers liés à la présence des déchets. Cet éloignement préserve le stockage des phénomènes de surface, de l'érosion

ainsi que des activités humaines « banales[11] »et limite ainsi la possible d'activités humaines à des forages de grande profondeur.

Compte tenu de la nature des déchets HA et MA-VL stockés, la protection des personnes doit être assurée sans dépendre d'un contrôle institutionnel au-delà d'une période limitée. La mémoire du stockage est maintenue le plus longtemps possible. Cette mémoire dépend notamment de la pérennité des mesures qui peuvent être mises en œuvre lors de l'archivage, des documents institutionnels résultant de la réglementation.

» LES OBJECTIFS DE SÛRETÉ POUR LA FONCTION « ISOLER LES DÉCHETS DES PHÉNOMÈNES DE SURFACE ET DES ACTIONS HUMAINES

- la profondeur de la roche hôte des ouvrages de stockage se situe à au moins 200 m[12] ;
- la mémoire est maintenue le plus longtemps possible. La date de 500 ans est retenue comme date minimale d'occurrence d'une intrusion humaine involontaire.

La deuxième fonction fondamentale de sûreté après fermeture consiste à limiter le transfert jusqu'à la biosphère des radionucléides contenus dans les déchets.

Après fermeture, l'objectif de la conception ne peut pas être de garantir un confinement complet des radionucléides dans le système de stockage sans limitation de durée.

La dégradation des colis de déchets HA et MA-VL se fera progressivement dans le temps et les radionucléides contenus dans ces déchets vont être relâchés potentiellement dans les ouvrages souterrains et la roche hôte.

Cela conduit à organiser les fonctions de sûreté pour maîtriser :

- les transferts par la voie aqueuse, de la majorité des radionucléides susceptibles d'être mis en solution puis de cheminer jusqu'à la surface ;
- les transferts par la voie gazeuse, de quelques radionucléides pouvant migrer sous cette forme.

L'eau est le principal facteur d'altération des colis de déchets et le principal vecteur de la migration des radionucléides. Le système de stockage vise à :

- s'opposer à la circulation d'eau c'est-à-dire :
  - ✓ limiter les flux d'eau, en distinguant le flux d'eau venant de la roche hôte des flux d'eau circulant via les liaisons surface-fond ;
  - ✓ limiter les vitesses de circulation de cette eau, depuis les alvéoles jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien par les ouvrages de liaison surface-fond.
- limiter le relâchement des radionucléides, et les immobiliser dans le stockage c'est-à-dire :
  - ✓ protéger les déchets de l'eau ;
  - ✓ limiter la mise en solution des radionucléides dans les alvéoles de stockage ;
  - ✓ limiter la mobilité des radionucléides dans les alvéoles de stockage ;
- retarder et atténuer la migration des radionucléides qui auraient été relâchés hors des colis puis des alvéoles de stockage, c'est-à-dire :
  - ✓ atténuer la migration à la fois dans le temps et dans l'espace. La migration d'une quantité de radionucléides conduit à un impact d'autant moindre que cette quantité se disperse sur une

[11] On entend par activité humaine banale, les activités de terrassement de chantier routier ou de construction de résidence par exemple, activités qui restent très limitées en termes de profondeur.

[12] Selon le guide de l'ASN de 2008 (8) « le site devra être choisi de telle sorte que la profondeur retenue pour les ouvrages de stockage des déchets visés par la présente règle permette de garantir que la sûreté du stockage ne sera pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion (notamment à la suite d'une glaciation), par l'effet d'un séisme, ou par les suites d'une intrusion humaine « banale ». L'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est a priori de l'ordre de 200 mètres ».

plus grande distance et que l'atteinte de la biosphère se fait de manière répartie et sur une période plus longue. L'augmentation du temps de transfert de radionucléides vers la surface peut ainsi réduire leur impact par décroissance radioactive au cours de la migration, en regard de leur période radioactive vs le temps de migration (cf. Figure 2-5).

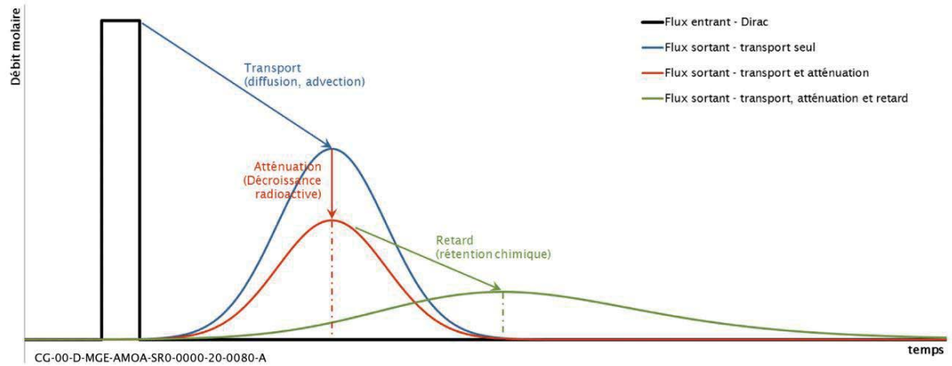


Figure 2-5 *Schéma illustrant les processus de décroissance, d'atténuation et de retard des radionucléides*

LES OBJECTIFS DE SURETÉ POUR LA FONCTION « LIMITER LE TRANSFERT JUSQU'À LA BIOSPHÈRE DES RADIONUCLÉIDES CONTENUS DANS LES DÉCHETS »

- La limitation du transfert jusqu'à la biosphère est assurée en premier lieu par le milieu géologique et plus particulièrement la couche du Callovo-Oxfordien.
- Les solutions techniques retenues pour la conception des ouvrages souterrains jouent un rôle complémentaire. Elles visent également à préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.
- Un composant du système de stockage peut participer à une ou plusieurs fonctions de sûreté pendant une période de temps spécifiée.
- Les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien et la conception (conception des alvéoles de stockage, organisation des ouvrages souterrains, scellements…), visent à bénéficier de la décroissance radioactive des radionucléides, de retarder et d'atténuer fortement la quantité et le niveau d'activité de ceux qui arriveraient potentiellement à la surface.

2.4.2 Les fonctions de sûreté en exploitation

L'article 3.1 de l'arrêté du 7 février 2012 (14) précise que « *la mise en œuvre du principe de défense en profondeur s'appuie notamment sur […] l'identification des fonctions nécessaires à la démonstration de sûreté nucléaire.* »

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

L'article L. 591-1 du code de l'environnement définit la sûreté nucléaire comme étant *« l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base, ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets ».*

Pour le centre de stockage Cigéo, comme pour toute installation nucléaire en France l'article 3.4 de l'arrêté du 7 février 2012 précise les fonctions de sûreté suivantes à prendre en considération :

« *-la maîtrise des réactions nucléaires en chaîne ; appelé couramment risque criticité ;*

- l'évacuation de la puissance thermique issue des substances radioactives et des réactions nucléaires ;

- le confinement des substances radioactives ;

- la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants. »

En complément de ces fonctions fixées par cette règlementation, la fonction d'évacuation des gaz formés par radiolyse est ajoutée pour le centre de stockage Cigéo.

Ces fonctions de sûreté doivent être maintenues pendant toute la phase de fonctionnement. Les principes retenus associés à ces fonctions de sûreté sont précisés ci-après.

Tableau 2-1 *Fonctions de sûreté nucléaire en phase de fonctionnement et principes retenus*

Fonctions de sûreté en phase de fonctionnement
Confiner les substances radioactives, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion de ces substances Cela est assuré par l'organisation des locaux/zones de l'installation en « systèmes de confinement » : La conception des colis et du centre de stockage doit permettre de maintenir un niveau de contamination aussi faible que possible dans les locaux et de limiter les rejets de substances radioactives à l'extérieur de l'installation.
Protéger les personnes contre l'exposition aux rayonnements ionisants La conception du centre repose sur le principe ALARA et les recommandations applicables aux stockages de déchets radioactifs édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).
Maîtriser la sûreté vis-à-vis du risque de criticité Les dispositions constructives (passives) sont privilégiées par rapport aux consignes d'exploitation afin de réduire les risques liés aux facteurs humains et organisationnels.
Évacuer la puissance thermique des déchets L'évacuation de la chaleur dégagée par les colis s'effectue, selon les cas, par conduction passive dans la roche ou via une fonction de ventilation/conditionnement d'air.
La maîtrise des risques liés aux gaz de radiolyse et de corrosion L'évacuation ou la maîtrise de l'hydrogène de radiolyse et/ou de l'oxygène afin de se prémunir des risques liés à l'apparition d'une atmosphère explosive.

2.5 Le socle de connaissances

2.5.1 La connaissance des colis de déchets

a) L'inventaire de référence

Les déchets radioactifs présents sur le territoire français sont répertoriés chaque année dans l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN)[13] réalisé par l'Andra sur la base des déclarations des producteurs de déchets. En complément de ces déclarations, des estimations prévisionnelles des volumes de déchets qui seront produits par les installations nucléaires pendant leur fonctionnement puis leur démantèlement, selon différents scénarios volontairement contrastés de politique énergétique fixés par le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), sont réalisées dans le cadre des éditions de l'IN. Ces évaluations prospectives permettent notamment de prévoir les solutions de stockage adaptées aux volumes de déchets radioactifs produits et à produire.

À cet égard, l'inventaire de référence repose sur l'inventaire des déchets HA et MA-VL déjà produits (environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL) et ceux qui seront produits à l'avenir par le fonctionnement et le démantèlement des installations nucléaires existantes et de celles dont la création a été autorisée à fin 2016 (EPR de Flamanville, ITER, réacteur expérimental Jules Horowitz), dans un scénario de poursuite de la production électronucléaire avec une hypothèse de durée de fonctionnement moyenne des installations électronucléaires en service de 50 ans, et de retraitement de la totalité des combustibles usés.

Le volume des déchets radioactifs de l'inventaire de référence, destiné à être stocké dans Cigéo si le centre de stockage est autorisé, est de l'ordre de 83 000 m³. Il correspond à environ 225 000 colis stockés.

Les déchets HA contiennent notamment des produits de fission et des actinides mineurs formés dans le combustible nucléaire lors de son passage dans le cœur du réacteur nucléaire. Ce sont les résidus non recyclables de la « combustion nucléaire ». Les déchets HA ont un dégagement thermique initial important (jusqu'à plusieurs centaines de Watt par colis), mais qui décroît dans le temps. Les déchets HA sont conditionnés sous forme vitrifiée. Le verre nucléaire isole efficacement de l'eau les produits de fission et d'activation et les actinides mineurs qui y sont incorporés. Un relâchement des substances radioactives ne peut s'effectuer qu'au fur et à mesure de l'altération du verre en présence d'eau.

[13] https://inventaire.andra.fr/

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
La démarche globale de sûreté

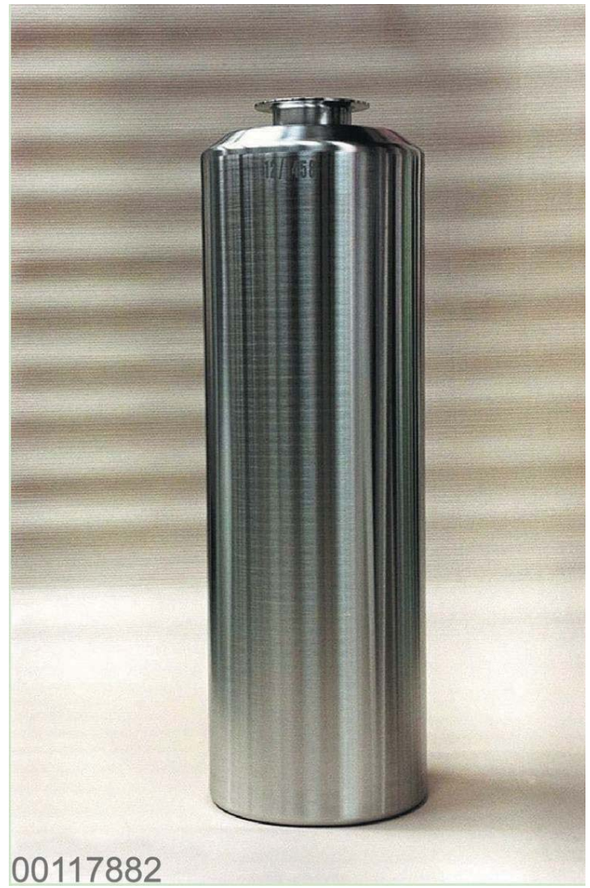


Figure 2-6 Illustration d'un colis primaire de déchets HA

Les colis de déchets HA se distinguent en deux catégories :

- la première, représentant une faible proportion, correspond aux colis HA « froids », c'est-à-dire ne dégageant pas une puissance thermique importante. Ils sont directement stockables dès l'autorisation de mise en service ;
- la seconde, représentant une grande proportion sont des colis très exothermiques (colis « chaud »), leur stockage ne pourra être immédiat. Leur stockage est envisagé à l'horizon de 2080.

Les déchets MA-VL présentent un niveau de radioactivité de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme et contiennent des quantités importantes de radionucléides à période longue. Les déchets MA-VL se composent principalement des pièces et des composants métalliques ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires, des déchets de la maintenance des installations nucléaires et de leur démantèlement, des résidus de décontamination. Les modes de conditionnement des déchets MA-VL sont très variables et adaptés à leurs natures variées. Les principaux modes de conditionnement sont le compactage, le bitumage et la cimentation.

Figure 2-7 Illustration d'un colis primaires de déchets MA-VL

LES COLIS DE L'INVENTAIRE DE RÉFÉRENCE

- L'inventaire de référence comprend deux catégories de colis de déchets HA et MA-VL.
- L'ensemble des colis de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence est reçu sur le centre de stockage Cigéo sous forme de colis de déchets conditionnés.
- Les conditionnements des déchets HA et MA-VL sont réalisés par les producteurs. Le produit fini à l'issue de chaque opération de conditionnement constitue le « colis primaire ».
- Les colis primaires sont des objets solides qui confinent les substances radioactives en leur sein.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
La démarche globale de sûreté

b) Les caractéristiques intrinsèques des familles de colis de déchets HA et MA-VL

Dès le début des recherches sur le stockage en couche géologique profonde des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, l'Andra et les producteurs de déchets ont convenu d'établir un identifiant unique[14] pour chaque famille de colis de déchets HA et MA-VL.

UNE FAMILLE DE COLIS

Une famille de colis représente un ensemble de colis présentant des caractéristiques (notamment procédé de fabrication, contenu chimique et radiologique, puissance thermique, niveau d'irradiation) similaires, au regard des utilisations qui sont faites de ces caractéristiques.

Les connaissances intrinsèques sur les colis de déchets HA et MA-VL sont fournies par les producteurs et suivent un processus d'analyse et d'instruction par l'Andra qui a constitué une base de données. L'Andra dispose ainsi d'un référentiel stabilisé et partagé au sein de l'Agence, de connaissances sur les colis primaires de déchets radioactifs, déjà produits ou à produire.

Ce référentiel, appelé « socle de connaissances des colis de déchets » permet de :

- regrouper, valider et maîtriser les informations recueillies ;
- mettre ces informations à la disposition des différents utilisateurs ;
- tout en garantissant la traçabilité des connaissances et de leurs évolutions.

Le « socle de connaissances des colis de déchets » se matérialise par une base de connaissances dénommée « OSCAR » (Organisation du Socle de Connaissances des Colis de l'Andra et du Référentiel). Les connaissances sur les colis primaires constituent des données d'entrée essentielles de la conception et de la démonstration de sûreté de Cigéo. L'utilisation de ces connaissances s'inscrit dans une démarche itérative, représentée schématiquement sur la figure ci-après.

L'Andra, à partir de l'ensemble de connaissances dont elle dispose, établit un socle de connaissances dont l'utilisation est fonction de la « finalité » : études de conception (dimensionnement structures/composants/équipements), évaluation de performances ou évaluation de sûreté en exploitation ou après fermeture.

[14] Les identifiants des familles de colis de déchets se présentent sous la forme d'un groupe de 3 ou 4 lettres définissant le producteur des colis suivi d'un numéro à trois ou quatre chiffres (par exemple CEA-050, EDF-080 ou ITER-010).

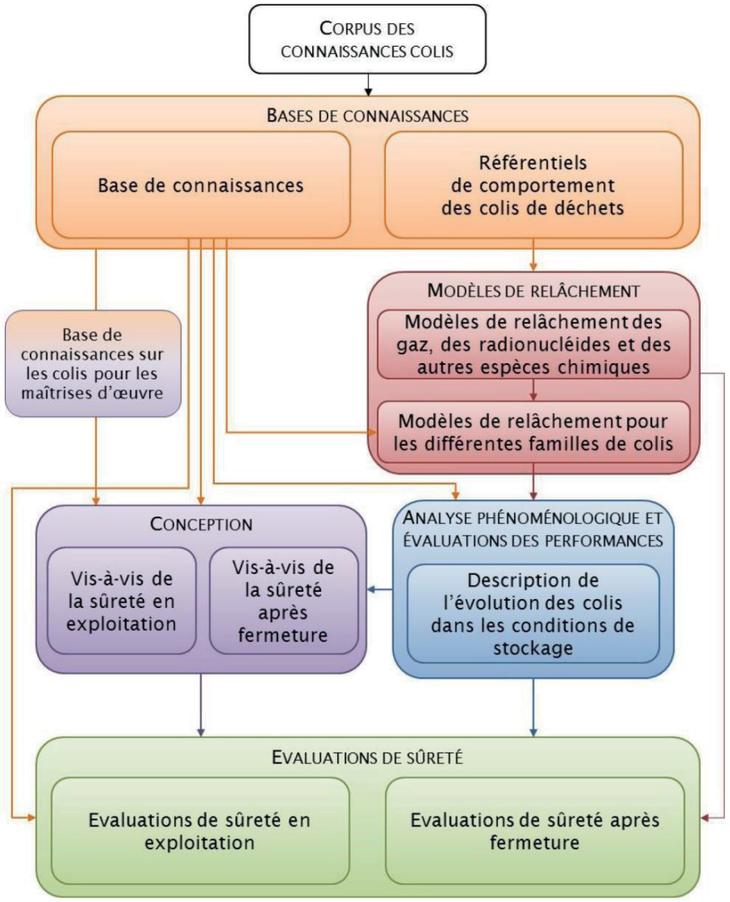


Figure 2-8 *Schéma du processus d'utilisation des connaissances des colis dans les études de conception et de sûreté*

» L'ÉTAT D'AVANCEMENT DE LA PRODUCTION DES COLIS DE L'INVENTAIRE DE RÉFÉRENCE

Une particularité des colis de déchets destinés à Cigéo est la coexistence de quatre niveaux d'avancement du processus de production des colis de déchets à ce stade et qui pourra perdurer au-delà de la demande d'autorisation de création :

- des familles regroupant des colis de déchets dont la production est terminée[15], pour lesquelles la définition du concept de stockage doit s'adapter ;
- des familles regroupant des colis de déchets en cours de production pour lesquelles le conditionnement des déchets est défini et une spécification de production des colis existe ;
- des familles regroupant des colis de déchets non encore produits à ce jour dont la définition du conditionnement des déchets est déjà bien avancée ;
- des familles regroupant des colis de déchets non encore produits à ce jour dont le conditionnement est encore à l'état de recherche.

Toutes les familles de colis de déchets appartenant à ces quatre catégories sont répertoriées et intégrées dans les études de conception et de sûreté.

Les colis de déchets arrivant sur le centre de stockage devront par ailleurs respecter les exigences de nature qualitative, quantitative ou déclarative que l'Andra aura spécifiées aux producteurs. Ces exigences sont regroupées dans les spécifications d'acceptation des colis mentionnées à l'article L. 542-12 du code de l'environnement.

2.5.2 La connaissance du site et de la couche du Callovo-Oxfordien

2.5.2.1 Un site répondant aux critères de sûreté après fermeture et qui limite les risques en exploitation

Les travaux de caractérisation du site menés dans le Laboratoire souterrain et depuis la surface ont contribué à conclure en 2005 à la faisabilité de principe d'un stockage géologique dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien en Meuse/Haute-Marne.

Les travaux de caractérisation menés depuis la surface ont également permis d'identifier une zone de 250 kilomètres carrés environ, située autour du Laboratoire souterrain, dans laquelle les résultats obtenus dans ce dernier pouvaient être transposés, outre le fait que cette zone est éloignée de toute faille majeure. Cette zone a été dénommée « zone de transposition » (ZT) et la faisabilité de principe du stockage géologique dans la couche du Callovo-Oxfordien y a été établie en 2005.

Afin d'avancer dans ses études, l'Andra s'est alors mise à la recherche, au sein de cette zone de transposition, d'une zone plus restreinte de 30 kilomètres carrés de la couche du Callovo-Oxfordien, propice à l'implantation des ouvrages souterrains, dans laquelle des techniques d'exploration approfondies seraient mises en œuvre pour acquérir des informations encore plus précises sur les caractéristiques du site. Cette zone a été dénommée « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (ZIRA).

La protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis des substances dangereuses contenues dans les déchets est l'enjeu déterminant qui a guidé l'Andra pour identifier la zone restreinte susceptible d'accueillir les ouvrages souterrains d'un éventuel stockage. En conséquence, les critères définis pour cette recherche visaient à privilégier, d'une part la bonne implantation de ces infrastructures dans la couche d'argile, d'autre part l'aptitude locale de la couche à répondre aux exigences de protection, en particulier à long terme.

[15] Certaines familles font l'objet d'une spécification de production

Les critères prépondérants à cette étape étaient donc de nature géologique. Ils concernaient notamment :

- l'épaisseur de la couche, qui est favorable au confinement à très long terme des substances dangereuses contenues dans les colis de déchets car elle augmente leur temps de migration vers l'environnement et limite leur quantité qui migre ;
- sa profondeur, qui permet d'éloigner les déchets de la biosphère, d'isoler le stockage et de le protéger des phénomènes de surface naturels et humains (tempêtes, inondations, érosion, glaciations, sécheresses, chantiers…) ;
- son éloignement des grandes failles (par exemple le fossé de Gondrecourt-le-Château), qui garantit la stabilité à long terme de la couche et empêche/limite le transfert éventuel des substances dangereuses vers l'environnement via ces failles ;
- sa faible inclinaison (pendage) qui simplifie la conception du stockage, notamment sur un seul niveau, et avec un positionnement dans la partie centrale de la couche. Une épaisseur importante de Callovo-Oxfordien peut ainsi être respectée au-dessus et en-dessous des ouvrages de stockage.

En second lieu, il a été vérifié que pour le site retenu, les critères techniques d'implantation en surface sont compatibles vis-à-vis de la sûreté en exploitation. Il a ainsi été vérifié que les caractéristiques du site ne présentaient pas d'aspect rédhibitoire vis-à-vis des risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication à proximité, à la fréquence de survol du site par des aéronefs et aux causes d'origine naturelle en l'occurrence ; le risque sismique, les risques liés aux conditions climatiques, à la foudre, à l'inondation (externe) et à l'incendie (externe). Pour chacun de ces risques, la démarche a consisté à identifier :

- la nature de l'aléa avec une description fondée sur les connaissances (cartographies…) ;
- leur occurrence sur la zone considérée, quantifiée en termes de probabilité dans certains cas (ex : chute d'avion au regard de la RFS I.1.a), en se fondant notamment sur la connaissance de ces aléas dans la zone (ex : carte des zones inondables…), sur le retour d'expérience d'observations et de mesures (ex : température, densité de foudre) ;
- selon l'occurrence et/ou la gravité, de conduire à exclure certaines zones potentielles et/ou d'identifier des zones pour lesquelles sont imposées des exigences de dimensionnement ;
- à l'issue, une cartographie récapitulant les contraintes vis-à-vis de l'implantation des installations de surface a été établie.

LE CHOIX DU SITE D'IMPLANTATION DU CENTRE DE STOCKAGE

Le choix d'implantation des installations de Cigéo (surface et souterrain) résulte d'une démarche progressive menée depuis 2006 avec une étape importante en 2009. Ainsi, l'Andra a déposé en 2009 un document relatif à la proposition d'une zone plus restreinte au sein de la ZT, la zone dite d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA), d'environ 30 km^2, et de scénarios d'implantation en surface. Ce document a fait l'objet d'une instruction par l'IRSN à la demande de l'ASN (15).

Le 5 janvier 2010, l'ASN a rendu un avis au ministre d'État, ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer et au ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche sur le document précité de l'Andra (16). Dans son avis, l'ASN estimait que les critères retenus par l'Andra pour choisir la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie étaient pertinents et cohérents avec le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de 2008. L'ASN a estimé que la localisation proposée par l'Andra pour la ZIRA était satisfaisante du point de vue de la sûreté et n'avait pas d'objection à la réalisation des travaux de reconnaissance prévus par l'Andra dans cette zone.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
La démarche globale de sûreté

2.5.2.2 Des campagnes d'investigations géologiques successives et des travaux scientifiques pour caractériser précisément le site d'implantation du stockage géologique

La représentation du milieu géologique et plus particulièrement du Callovo-Oxfordien, est fondée sur l'acquisition de connaissances concernant son histoire géologique et ses caractéristiques dans son état actuel.

Celle-ci s'est appuyée sur des campagnes d'investigations géologiques et sur un important programme mené dans le Laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne, à partir d'échantillons prélevés en forages, ou de mesures *in situ*.

L'acquisition des connaissances sur le milieu géologique du secteur de Meuse/Haute-Marne s'est organisée autour de plusieurs démarches complémentaires :

- plus d'une quarantaine de forages profonds de plusieurs centaines de mètres ont confirmé l'homogénéité de la formation-hôte et l'absence de faille. Les carottes qui en ont été extraites ont permis de préciser la géométrie des couches composant le sous-sol. Elles ont également permis d'approfondir les connaissances sur le comportement géomécanique des argilites constituant la couche du Callovo-Oxfordien[16] et d'élaborer des modèles de comportement pour établir des prévisions d'endommagement de la roche selon le type de construction de l'installation souterraine ;
- différentes campagnes sismiques 2D (1994-1996) et 3D en 2000 (4 km^2) et 2008-2010 (37 km^2) ont permis de préciser la disposition des différentes formations géologiques et de les caractériser, notamment la couche du Callovo-Oxfordien (épaisseur, profondeur, pendage…). Elles ont successivement permis d'obtenir une image en volume du site avec une résolution plus fine et confirmé que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien est régulière avec une épaisseur entre environ 140 et 160 m sur la ZIRA et une géométrie conforme à l'histoire des dépôts qui se sont succédés au Callovo-Oxfordien. Ces campagnes ont aussi permis de montrer qu'aucune faille de rejet vertical supérieur à 2 m environ n'est présente ni dans la couche du Callovo-Oxfordien ni dans les horizons sus-jacents des calcaires de l'Oxfordien ;
- des études de terrains pour observer les formations à l'affleurement (tant à l'échelle du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne que du secteur), appréhender les grands traits de l'environnement géologique, prélever des échantillons et intégrer les données dans des modèles ;
- des analyses au Laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne pour tester les méthodes et les outils et conforter le modèle géologique par l'apport de données sédimentologiques et microstructurales. Durant tout le creusement des puits à partir d'août 2000, les relevés continus de toutes les formations traversées ont permis d'établir une carte géologique détaillée de la paroi sur toute la hauteur des deux puits, d'évaluer la variabilité lithologique des couches à l'échelle décamétrique, d'observer leur nature selon les directions, de caractériser leur fracturation et micro-fracturation naturelles et d'en évaluer l'incidence sur les circulations de fluides. Les observations réalisées depuis le début du creusement des puits confirment les données sédimentaires et tectoniques déjà acquises par les forages et fournissent des données structurales quantifiées précises qui confortent le modèle géologique.

[16] Argilite : roche sédimentaire argileuse indurée à grain fin (particules d'une taille inférieure à 2 microns, minéraux des argiles accompagnés souvent de quartz très fin) et très peu perméable.

UNE COMPRÉHENSION FINE DU MILIEU GÉOLOGIQUE DU SITE DE MEUSE/HAUTE-MARNE

Les travaux de caractérisation menés depuis plus d'une vingtaine d'années ont permis d'acquérir une très bonne connaissance de la zone d'implantation des ouvrages souterrains et en particulier des propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien à l'actuel et de l'évolution du site à long terme.

L'ensemble des connaissances permet ainsi :

- de s'assurer que le Callovo-Oxfordien présente les propriétés attendues au regard des critères de choix de site du guide de sûreté de l'ASN ;
- de justifier la localisation des ouvrages souterrains au sein du Callovo-Oxfordien, au regard de la satisfaction optimale de leurs fonctions de sûreté, en tenant compte des contraintes techniques et d'insertion dans le territoire ;
- d'évaluer l'évolution à long terme du milieu géologique, notamment l'effet des éventuelles perturbations apportées par l'installation de stockage (ouvrages et colis de stockage) et l'effet des évolutions géodynamiques externe (climat) et interne (tectonique), en particulier sur l'érosion depuis la surface et les écoulements d'eau en profondeur.

On dispose ainsi d'une représentation d'ensemble et cohérente du site, notamment sur les plans sédimentologique, structural, hydrogéologique, géo-mécanique, géochimique et thermique, donnant une reconstitution de son histoire géologique passée jusqu'à l'état actuel et son évolution.

2.5.2.3 Des acquis de connaissances qui confirment les caractéristiques très favorables de la couche du Callovo-Oxfordien pour l'implantation d'un stockage

Les connaissances acquises depuis plus d'une vingtaine d'années en particulier via la reconnaissance du milieu géologique depuis la surface (études sismiques, forages) et les expérimentations menées dans le Laboratoire souterrain montrent que :

- cette couche est stable depuis environ 160 millions d'années, située dans une zone, le Bassin parisien, reconnu comme très peu sismique, et localisée à une profondeur d'environ 500 m, soit bien supérieure à celle de l'érosion possible à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années (inférieure à 200 m) ; elle protège ainsi le stockage des phénomènes d'évolution géodynamique (tectonique, climat, érosion) sur le prochain million d'années et en limite les effets potentiels sur le stockage ;
- la géométrie du Callovo-Oxfordien en couche sub-plane et son épaisseur permettent d'y accueillir l'installation souterraine et, associées à une architecture planaire de cette dernière, d'y ménager au-dessus et en-dessous des épaisseurs importantes de la couche du Callovo-Oxfordien (d'au moins 50 m). Associées aux caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien, ces épaisseurs contribuent à retarder, limiter et atténuer les substances radioactives relâchées par les colis de déchets, qui migreraient potentiellement depuis le stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les caractéristiques hydrauliques de la couche du Callovo-Oxfordien limitent les circulations d'eau. En effet, sa perméabilité très faible à l'eau (entre environ quelques 10^{-14} à 10^{-13} m/s) expliquée notamment par la nature argileuse de la couche du Callovo-Oxfordien et la finesse et les très petits diamètres des pores, ainsi que les faibles gradients hydrauliques verticaux limitent fortement les flux d'eau au sein même de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les propriétés de diffusion des substances dans l'eau de la couche du Callovo-Oxfordien retardent et limitent la migration des substances dans l'eau (solutés). La diffusion est le mécanisme dominant de la migration des solutés. Les faibles coefficients de diffusion conduisent, à des temps caractéristiques de transfert diffusif supérieurs à 100 000 ans pour un soluté sans rétention. La rétention conduit à accroître le temps de migration des radionucléides ;

- la composition chimique de l'eau de la couche du Callovo-Oxfordien contenue dans ses pores favorise la faible solubilité de la majorité des radionucléides ;
- les capacités de rétention de la couche du Callovo-Oxfordien vis-à-vis de l'essentiel des substances radioactives et des substances chimiques toxiques, du fait des minéraux argileux, contribuent à retarder et limiter plus encore leur migration.

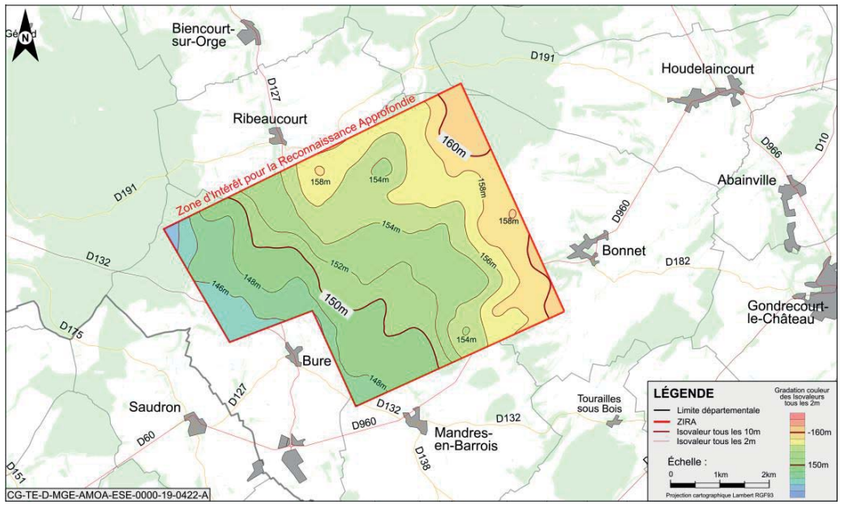


Figure 2-9 La zone d'implantation des ouvrages souterrains

LES CARACTÉRISTIQUES TRÈS FAVORABLES DE LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

- Une profondeur depuis la surface d'environ 500 m.
- Une couche stable depuis environ 160 millions d'années.
- Une épaisseur d'environ 140 et 160 m.
- Des caractéristiques hydrauliques limitant les circulations d'eau.
- Une diffusion des solutés très faible.
- Des caractéristiques physico-chimiques favorisant la rétention et la faible solubilité de la majorité des radionucléides et leur très faible migration.

2.6 Les principes de conception

LES PRINCIPES QUI GUIDENT LA CONCEPTION :

- un principe de défense en profondeur (Redondance des dispositions, Robustesse) ;
- des choix de conception du centre de stockage Cigéo répondant à des exigences de sûreté après fermeture et de sûreté d'exploitation.

LA RECHERCHE DE SOLUTIONS RÉPONDANT A CES PRINCIPES VISÉS :

- la prise en compte des deux grandes données d'entrées que sont les colis à stocker et les caractéristiques du site d'implantation ;
- la simplicité des solutions (utilisation du retour d'expérience d'autres industriels, d'homologues, d'essais au Laboratoire souterrain).

2.6.1 La défense en profondeur

LE PRINCIPE DE DÉFENSE EN PROFONDEUR

Le principe de défense en profondeur, pour les installations nucléaires de base, conduit à la mise en place d'une série de lignes de défense successives, chacune pouvant intervenir après la défaillance de la précédente, aptes à prévenir l'apparition ou, le cas échéant, à limiter les conséquences de défaillances techniques, humaines ou organisationnelles susceptibles de conduire à des situations accidentelles pouvant affecter la protection de l'homme ou de l'environnement.

En exploitation, conformément à l'arrêté du 7 février 2012 (14), le principe de défense en profondeur vise à se prémunir des défaillances envisagées par la mise en place de lignes de défenses (ou barrières) successives. Il consiste à interposer entre la source de danger (ex : la substance radioactive) et le public, les travailleurs ou l'environnement, un nombre suffisant de dispositions techniques et organisationnelles (lesdites lignes de défenses successives) permettant d'éliminer ou de limiter le risque considéré jusqu'à un niveau acceptable. Ces dispositions sont proportionnées à l'importance des risques ou inconvénients présentés par l'installation (Article 1.1 de l'arrêté du 7 février 2012). Les niveaux de défense en profondeur s'organisent en quatre niveaux :

- la prévention, visant à éviter l'apparition des défaillances ;
- la surveillance, afin d'anticiper ou de détecter rapidement les dysfonctionnements ;
- la maîtrise des accidents n'ayant pu être évités, afin de ramener puis de maintenir l'installation dans un état sûr ;
- la gestion des accidents n'ayant pu être maitrisés afin de limiter les conséquences sur les personnes et l'environnement.

En après fermeture, la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage géologique repose sur des dispositifs passifs sans besoin d'intervention. Le principe de défense en profondeur a pour effet de faire reposer la sûreté du stockage sur la complémentarité et la diversité des composants et sur un certain niveau de redondance des fonctions de sûreté de telle sorte que des défaillances plausibles de composants ne compromettent pas, à elles seules, la sûreté de l'installation.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
La démarche globale de sûreté

La transposition du principe de défense en profondeur se traduit par :

- l'attribution aux composants naturels et ouvragés du système de stockage de fonctions de sûreté complémentaires. Le site et en particulier la roche hôte sont choisis pour leurs caractéristiques favorables ; la conception vise la préservation des caractéristiques de la roche hôte ;
- des activités de surveillance sont mises en place dès la construction puis pendant l'exploitation nucléaire pour le suivi des composants naturels et ouvragés assurant des fonctions de sûreté après fermeture ;
- des scénarios évalués (défaillance de composants, situations hypothétiques postulées) pour tester la robustesse du système de stockage dans son ensemble et l'apport de chaque composant sont définies.

2.6.2 Les choix de conception

Les recherches des solutions techniques répondent (cf. Chapitres 1.2 et 1.3) aux fonctions de sûreté après fermeture et en exploitation, ainsi qu'aux exigences associées identifiées.

La recherche des solutions techniques vise les deux objectifs suivants :

- les choix de conception sont guidés par les risques liés à la présence de colis de déchets radioactifs et à leur manutention. En effet, les colis de déchets confinent la radioactivité et sont les éléments importants pour la sûreté à protéger. Les opérations de manutention visent donc à manipuler les colis dans des conditions en les protégeant des risques potentiels d'agressions. Les installations et les ouvrages souterrains dans lesquels transitent les colis puis sont stockés visent la recherche de conditions d'ambiance favorables ;
- les choix de conception sont également guidés par les risques de relâchement des substances radioactives hors des colis de déchets radioactifs et leur migration éventuelle vers la surface sous forme de solutés. Le système de stockage après fermeture repose particulièrement sur la couche du Callovo-Oxfordien, et les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond, qui assurent des fonctions de sûreté complémentaires. La conception cherche donc d'une part à concevoir des ouvrages souterrains et des scellements qui limitent à la fois la circulation de l'eau dans ces ouvrages et la migration des substances radioactives vers la surface. Compte tenu du rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien, la conception de l'architecture et des ouvrages souterrains et la conception des scellements visent également à préserver ses caractéristiques très favorables, en limitant les perturbations apportées par les colis, notamment par leur caractère radioactif et le caractère thermique pour les colis les plus exothermiques et par les composants ouvragés laissés en place dans les ouvrages souterrains au moment de leur fermeture.

2.6.2.1 Les choix de conception des conteneurs de stockage

a) Les conteneurs de stockage HA

LE COLIS DE STOCKAGE HA

Les colis de stockage HA sont constitués d'un colis primaire HA provenant des producteurs de déchets complété par un conteneur de stockage.

Après fermeture, les colis de stockage HA empêchent puis limitent le relâchement des substances radioactives contenues dans les déchets :

- le conteneur de stockage en acier assure à lui seul le confinement des colis de déchets HA aussi longtemps qu'il conserve son étanchéité à l'eau. Cela correspond à une première période après fermeture (de l'ordre de quelques centaines d'années) caractérisée par une activité encore élevée des radionucléides à période courte et moyenne des déchets HA (cf. Chapitre 4.2 du guide n° 1 de l'ASN de 2008 (8)). Cette période permet également de mobiliser les caractéristiques de la couche

du Callovo-Oxfordien et de la matrice de verre dans des conditions thermiques correspondant à une bonne connaissance du comportement des substances radioactives en température et à une faible dissolution de la matrice verre du fait de la présence d'eau ;

- la matrice de verre limite les relâchements des substances radioactives, après la perte d'étanchéité du conteneur de stockage HA.

Les conteneurs de stockage HA sont de forme cylindrique. Ils sont constitués d'un corps et d'un couvercle qui sont soudés. Des patins en céramique sont mis sur le conteneur pour faciliter la mise en place du colis de stockage dans son alvéole de stockage et son retrait.

CG-01-D-MGE-AMOA-CS0-7000-17-0005-A

Figure 2-10 Illustration d'un colis de stockage de déchets vitrifiés avec son conteneur de stockage

L'Andra retient comme matériau constitutif du conteneur de stockage l'acier non allié à bas carbone. Ce choix est justifié principalement par le caractère prédictible de la cinétique de corrosion de ce matériau ainsi que de ses soudures, dans la mesure où la corrosion généralisée en est le mécanisme prépondérant par rapport aux processus de corrosion localisée.

Des essais ont été réalisés pour vérifier la faisabilité technologique de la solution technique proposée (cf. Figure 2-11).

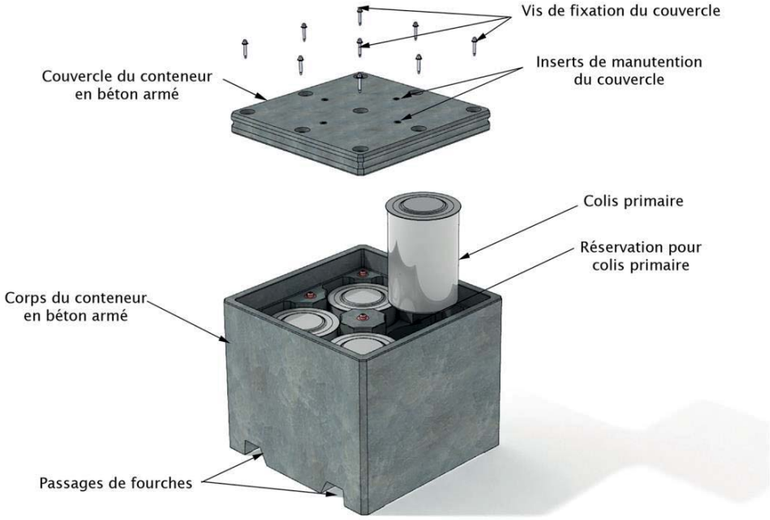
Figure 2-11 Illustration d'essais réalisés sur conteneurs HA

b) Les conteneurs de stockage MA-VL

Au stade du DOS, seul le mode de stockage de colis MA-VL en conteneur de stockage est étudié. La possibilité de stocker certains colis primaires MA-VL sans ajout d'un conteneur de stockage est envisagée. Dans ce cas, le colis primaire est considéré en l'état comme un colis de stockage.

Lorsque le colis primaire est complété par un conteneur de stockage, l'ensemble colis primaire et conteneur de stockage constitue alors le colis de stockage transféré en installation souterraine pour y être stocké. Le colis de stockage MA-VL (cf. Figure 2-12) est alors constitué :

- d'un conteneur comprenant les deux éléments préfabriqués suivants :
  - ✓ corps de conteneur doté de cloisons internes qui ménagent des réservations ajustées à la forme des colis primaires ;
  - ✓ couvercle de fermeture ;
- d'un ou plusieurs colis primaire(s).



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

Figure 2-12 Illustration d'un colis de stockage MA-VL

Compte tenu de la variabilité des familles de colis de déchets MA-VL, le développement des conteneurs se fait de manière à standardiser les conteneurs de stockage permettant ainsi de mutualiser les équipements sur l'installation. La fabrication d'une quantité limitée de modèles de conteneurs comparativement au nombre de colis primaires permet de procéder à une fabrication en mode industriel, et garantir la reproductibilité des performances et la garantie du respect des fonctions attribuées au conteneur.

Le matériau constitutif du conteneur de stockage est le béton armé pour la majorité des familles (une faible quantité est en acier pour quelques colis primaires de grandes dimensions). Le choix de ce type de matériaux « classiques » associé à une géométrie également « classique » facilite son industrialisation.

Le choix du béton pour la fabrication du conteneur de stockage est fondé sur les meilleures techniques disponibles. Il s'agit d'un matériau connu tant pour sa mise en œuvre que pour son évolution. De plus, l'Andra dispose d'un retour d'expérience lié à un nombre important d'essais de fabrication de démonstrateurs (cf. Figure 2-13). Des essais ont été menés avec ces conteneurs de stockage pour qualifier leur dimensionnement vis-à-vis des conditions d'exploitation (tenue au gerbage), ou des risques liés à la manutention (chute), à la tenue au feu ou encore au comportement d'une pile au séisme.

Figure 2-13 *Illustration des étapes de fabrication de prototypes de conteneurs de stockage MA-VL*

2.6.2.2 Les choix de conception des moyens de manutention des colis de déchets radioactifs

Les opérations de manutention des colis sont essentiellement des opérations de réception des colis de déchets expédiés par les producteurs, leur contrôle et leur préparation pour le stockage, leur transfert vers les ouvrages de stockage et leur mise en alvéole de stockage.

Le colis étant le système de confinement de la radioactivité :

- les contrôles sur les colis dès leur arrivée puis lors des différentes opérations de manutention permettent de maitriser leur qualité ;
- le colis est protégé des agressions externes (chute d'avions, tempêtes...) en étant toujours manutentionné à l'intérieur des installations, conçues pour y résister ;
- les équipements de manutention sont conçus pour protéger le colis de déchets en particulier en minimisant les hauteurs de levage et de transfert des colis et en limitant la charge calorifique ;

- toutes les opérations sur les colis sont automatisées et suivies par vidéo-surveillance à partir de la salle de conduite centralisée permettant ainsi de vérifier à tout instant ce qui arrive au colis et où il se situe dans l'installation, ceci afin de limiter l'exposition du personnel ;
- à l'arrivée au fond, les hottes chargées de colis sont acheminées *via* des systèmes de transfert automatisés sur rails jusqu'aux alvéoles de stockage dans lesquels ils sont introduits par couche pour minimiser également les hauteurs de levage.

Les solutions technologiques standards et éprouvées pour les équipements de manutention sont privilégiées et s'appuient le retour d'expérience d'essais technologiques, d'autres installations nucléaires ou d'installations industrielles.

Les solutions technologiques prennent en compte la récupérabilité : les moyens de retrait sont similaires aux moyens de mise en stockage.

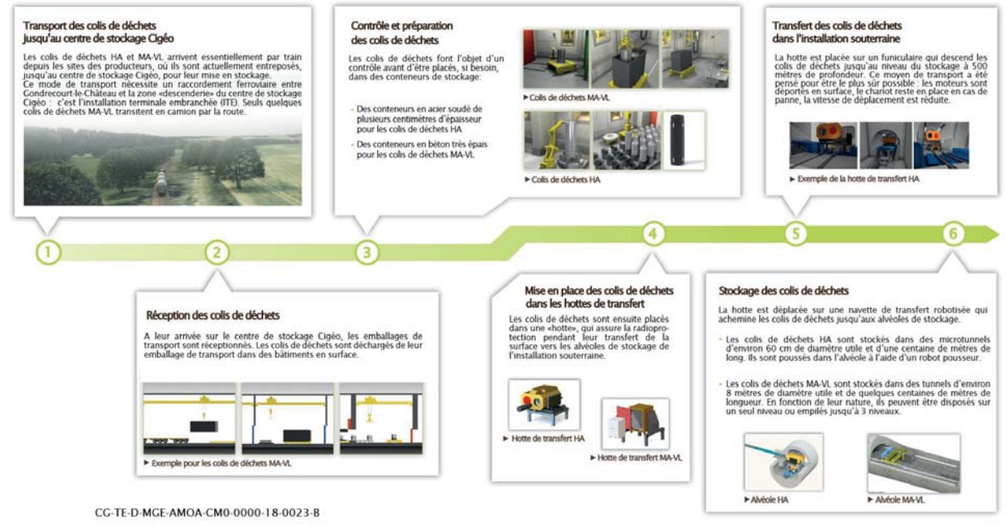


Figure 2-14 *Cheminement des colis de déchets jusqu'à leur emplacement de stockage*

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
La démarche globale de sûreté

2.6.2.3 Les choix de conception du système de stockage après fermeture

Pour réaliser les fonctions de sûreté après fermeture, l'Andra retient un ensemble de principes généraux de conception, synthétisés dans le tableau 2-2 ci-dessous, qui intègrent notamment les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien retenue à cet effet.

Tableau 2-2 *Principes de conception, en regard des fonctions de sûreté après fermeture du système de stockage*

Fonctions de sûreté après fermeture	Choix de conception
Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines	• Implantation des galeries et ouvrages de stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'écart des structures géologique, failles… (potentiellement) hydrauliquement actives. • Maintien des dispositifs de mémoire du stockage le plus longtemps possible après sa fermeture[17] (500 ans minimal selon le guide de l'ASN n° 1 de 2008)(8).
S'opposer à la circulation d'eau	• Implantation dans la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle les écoulements d'eau sont faibles du fait de sa faible perméabilité. • Regroupement des puits et de la base des descenderies au niveau de la couche du Callovo-Oxfordien et scellement de ces ouvrages pour minimiser les circulations d'eau potentielles via ces derniers ; du fait de sa faible perméabilité. • Architecture souterraine en grand « borgne » et quartiers de stockage « borgnes » par rapport au reste de l'installation souterraine, afin de minimiser les flux d'eau au sein du stockage en sollicitant uniquement les flux d'eau au sein du Callovo-Oxfordien, par nature faibles du fait de sa faible perméabilité.
Limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans l'alvéole	• Conteneur de stockage HA qui permet (ii) de retarder l'arrivée de l'eau sur les déchets et évite l'altération aqueuse en température et corrélativement (ii) de favoriser la maîtrise du comportement en solution des substances radioactives relâchées dans l'alvéole. • Choix de matériaux d'alvéoles visant à favoriser une faible solubilité et/ou une rétention des substances radioactives (par exemple l'environnement cimentaire dans les alvéoles MA-VL). • Conditions physico-chimiques dans les alvéoles limitant le relâchement et la mobilité des substances radioactives dans l'alvéole (favoriser par exemple des conditions redox réductrices).
Retarder et atténuer la migration des radionucléides	• Implantation des ouvrages souterrains dans la partie médiane du Callovo-Oxfordien en tenant compte des contraintes techniques de construction et d'exploitation, architecture de type planaire de l'installation, afin de favoriser un maximum de garde de la couche du Callovo-Oxfordien de part et d'autre des alvéoles de stockage. • Géométries des alvéoles et des galeries de l'installation souterraine optimisées, particulièrement leurs longueurs ⇨ la migration des substances radioactives le long des ouvrages est limitée et la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est privilégiée par rapport à celle par les ouvrages de stockage.

[17] *A minima* sur 500 ans

Fonctions de sûreté après fermeture	Choix de conception
Préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés contribuant à la sûreté après fermeture	• Température maximale de 100 °C dans le Callovo-Oxfordien afin de favoriser la maitrise du comportement de ce dernier en température, notamment en limitant les phénomènes physico-chimiques en température et en restant dans un domaine de température facilement accessible à l'expérimentation et la compréhension. • Choix de matériaux des composants ouvragés « compatibles » avec les caractéristiques du Callovo-Oxfordien, afin de limiter les interactions physico-chimiques en tant que de besoin et possible, en particulier pour favoriser leur durabilité et préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien.

La réalisation de ces fonctions oriente la conception de deux grands composants du système de stockage après fermeture :

- l'architecture de l'installation souterraine et notamment son organisation (globalement « borgne », zones de stockage « borgnes », base des ouvrages de liaison surface/fond regroupés au niveau du Callovo-Oxfordien, implantation sur un seul niveau) contribuent au confinement des substances radioactives au plus près des déchets, au maintien de conditions d'écoulements très lents dans le stockage et à la préservation de gardes de Callovo-Oxfordien saines d'épaisseurs importantes de part et d'autre[18] du stockage ;
- les ouvrages de fermeture et en particulier les scellements complètent le dispositif en évitant le court-circuit du Callovo-Oxfordien par les ouvrages, assurant ainsi une continuité de l'étanchéité globale du système de stockage.

a) L'architecture de l'installation souterraine

L'architecture dans son ensemble

L'organisation des liaisons surface-fond, des galeries et alvéoles de stockages, s'adaptent aux caractéristiques des colis de déchets HA et MA-VL et de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les choix de conception suivants visent à tirer parti des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien et à les préserver :

- la structure générale de l'architecture (diamètres des galeries et des alvéoles) et son implantation quasi-plane vise à préserver les épaisseurs importantes de la couche du Callovo-Oxfordien entre les ouvrages souterrains et les formations encaissantes de la couche (Oxfordien calcaire et Dogger), favorables au retard et à la limitation de la migration des substances radioactives ;
- les longueurs des alvéoles de stockage HA et MA-VL aussi grandes que possibles et nécessaires sont recherchées, tout en respectant les autres exigences vis-à-vis notamment de la sûreté pendant le fonctionnement du stockage, afin de favoriser la migration des radionucléides préférentiellement par la couche du Callovo-Oxfordien[19] ;
- le regroupement des puits et de la base des descenderies dans une même zone d'emprise restreinte dans le Callovo-Oxfordien permet de limiter les « moteurs hydrauliques » entre les ouvrages de liaison surface-fond depuis l'Oxfordien calcaire, qui seraient de nature à augmenter les circulations d'eau au sein du stockage[20], plus particulièrement au niveau des quartiers de stockage. Les (très) faibles gradients hydrauliques verticaux dans la couche du Callovo-Oxfordien où sont implantés les puits contribuent par ailleurs à limiter les éventuelles circulations d'eau au sein du stockage entre ces ouvrages ;
- chaque quartier de stockage est borgne par rapport au reste de l'installation souterraine c'est-à-dire que les accès à chaque quartier sont peu nombreux et tous reliés à la même zone d'emprise restreinte des liaisons surface fond. Le flux d'eau drainé vers les liaisons surface-fond dans chaque quartier borgne se limite ainsi à celui venant de la couche du Callovo-Oxfordien, et est donc très faible du fait notamment de sa faible perméabilité. La migration des solutés par advection au sein de chaque quartier -c'est-à-dire par entrainement avec le déplacement de l'eau- s'en trouve réduite, favorisant la migration des substances radioactives par la couche du Callovo-Oxfordien ;
- le positionnement des ouvrages de stockage des déchets HA les plus radioactifs permet de limiter la migration des substances radioactives depuis la zone de stockage des déchets HA vers les puits et les descenderies notamment en cas de défaillances des scellements ;
- le choix des matériaux pour limiter les perturbations du stockage sur la couche du Callovo-Oxfordien afin qu'elle joue pleinement son rôle central dans la sûreté à long terme (cf. Chapitre 4.2).

La conception de l'architecture dans son ensemble est fondée sur un développement par tranche conformément au plan directeur pour l'exploitation de Cigéo (PDE).

Les alvéoles de stockage HA

Les options de conception suivantes sont retenues :

- les alvéoles HA sont organisés en quartiers (cf. Chapitre 1).
- les alvéoles sont des micro-tunnels « borgnes » d'environ 70 cm de diamètre et de l'ordre de 80 m à 100 m de long (au stade du DOS).
- ils sont faiblement inclinés (pente de l'ordre de 1 %).
- ils sont creusés parallèlement à la contrainte mécanique *in situ* majeure (horizontale) afin de minimiser l'endommagement à leur pourtour en vertical et préserver des gardes de Callovo-Oxfordien sain importantes de part et d'autre (le faible diamètre contribue aussi à cela).
- le dimensionnement du chemisage en acier (d'une épaisseur minimale de 25 mm) permet la mise en place des colis de déchets et leur retrait sur toute la durée de la phase de fonctionnement.
- les colis de stockage HA sont placés les uns derrière les autres et à l'horizontal au sein du chemisage.

Ces options de conception permettent de garantir une garde de la couche du Callovo-Oxfordien saine (non endommagée mécaniquement) importante au-dessus et en-dessous des alvéoles et de réduire la part de radionucléides susceptibles de migrer longitudinalement vers les galeries puis vers et par les liaisons surface-fond.

Le grand élancement de l'alvéole contribue à minimiser la migration potentielle des substances radioactives contenues dans les déchets radioactifs vers les galeries.

[18] Comme observé dans tout milieu géologique, le creusement des ouvrages souterrains crée un endommagement (fracturation) de la couche du Callovo-Oxfordien. Les travaux menés dans le Laboratoire souterrain et les observations dans d'autres roches argileuses (Opalinus Clay en Suisse, Argle de Mol en Belgique) montrent que la zone endommagée est limitée au champ proche des ouvrages, quelques mètres. En outre, du fait des minéraux argileux, notamment de minéraux gonflants, les smectites, il a été montré que les argilites endommagées se cicatrisent sur le plan hydraulique, en récupérant des perméabilités proches de celle des argilites non endommagées.

[19] Les faibles flux d'eau au sein des alvéoles, leur grande longueur, et corrélativement leur grande surface d'échange avec la couche du Callovo-Oxfordien, favorisent un effet de transfert des substances radioactives préférentiellement vers la couche du Callovo-Oxfordien (« effet de pompe diffusive » par le Callovo-Oxfordien).

[20] Circulation préférentielle en U entre les ouvrages de liaison surface-fond.

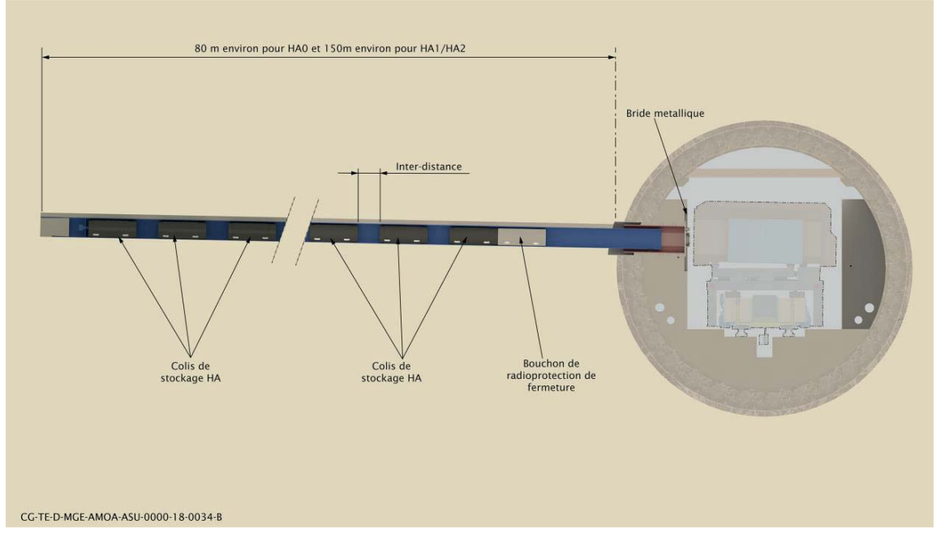


Figure 2-15 Coupe longitudinale schématique d'un alvéole HA

Les alvéoles de stockage MA-VL

Les options de conception sont les suivantes :

- les alvéoles MA-VL sont organisés en quartiers (cf. Chapitre 1) ;
- l'alvéole MA-VL (cf. Figure 2-16) est un ouvrage de type tunnel d'environ 10 m de diamètre excavé (8 m environ de diamètre utile pour l'emplacement des colis de stockage) et une longueur utile maximale d'environ 500 m , avec un revêtement et un génie civil en béton ;
- les alvéoles sont creusés parallèlement à la contrainte mécanique in situ majeure (horizontale) afin de minimiser l'endommagement à leur pourtour en vertical et préserver des gardes de Callovo-Oxfordien sain importantes de part et d'autre ;
- les alvéoles MA-VL sont conçus et équipés pour permettre le positionnement des colis de déchets MA-VL verticalement et par couche en réduisant les hauteurs de levage ;
- chaque alvéole MA-VL est dimensionné et organisé selon des règles de co-stockage géométriques et /ou physico-chimiques, en fonction de la nature et des dimensions du type de colis de déchets MA-VL qu'ils accueillent, afin de favoriser les propriétés de confinement des colis de déchets en limitant les interactions physico-chimiques, et de limiter le taux de vide après remplissage.

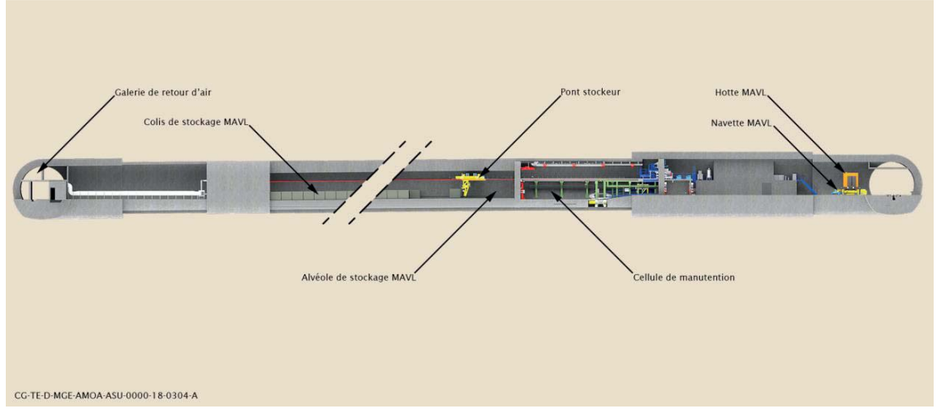


Figure 2-16 Coupe longitudinale schématique d'un alvéole MA-VL

b) Les scellements

Les scellements visent à privilégier la migration des radionucléides relâchés par les colis de stockage par la couche du Callovo-Oxfordien, composant central du système de stockage, par rapport à la migration par les ouvrages souterrains, notamment vers et par les ouvrages de liaison (puits et descenderies) :

- les scellements (cf. Figure 2-17) mis en place s'opposent à la circulation d'eau au sein des ouvrages souterrains :
  - ✓ de par leur position spécifique, les scellements des puits et des descenderies, verticaux et inclinés, (dits « scellements de liaison surface-fond ») contribuent à la protection de l'homme et l'environnement après fermeture sur le long terme. Implantés au niveau de la couche du Callovo-Oxfordien, ils limitent les perturbations hydrauliques issues des formations encaissantes sus-jacentes, contribuent à limiter les flux d'eau au sein du stockage et ainsi isolent hydrauliquement les ouvrages souterrains. Des scellements de galeries, horizontaux, (dits « scellements fond ») jouent un même rôle de manière complémentaire et redondante aux scellements de liaison surface-fond, au plus près des quartiers et des alvéoles ;
  - ✓ la présence de scellements limite de fait la migration des substances radioactives qui potentiellement seraient relâchées par les alvéoles dans les galeries.

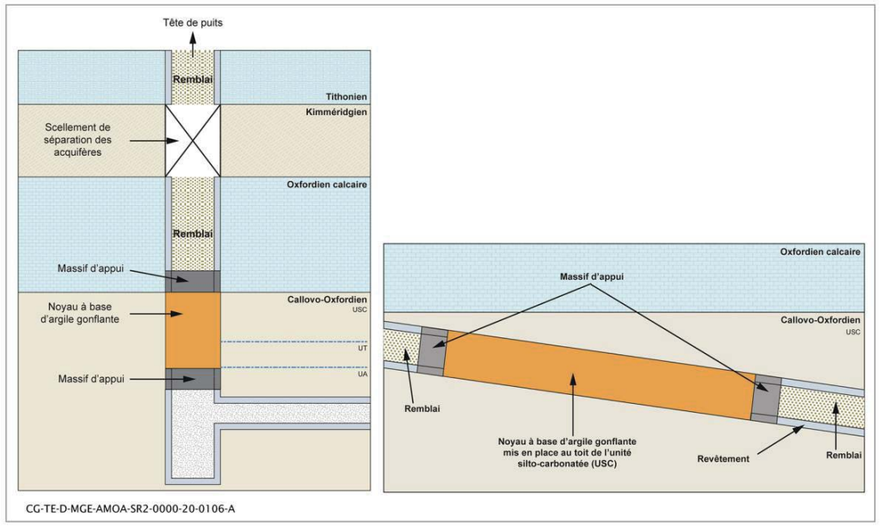


Figure 2-17 Schéma de principe des scellements de liaison surface-fond

La conception des scellements s'appuie sur l'utilisation des argiles gonflantes, matériaux connus, simples, robustes et tolérants aux sollicitations notamment physiques (thermique, mécanique, hydraulique et gaz), durables et dont les propriétés hydrauliques et hydromécanique sont façonnables au regard de la performance hydraulique et hydromécanique recherchée. Les solutions retenues au stade des options de sûreté s'appuient ainsi sur le retour d'expérience de nombreux essais et maquettes réalisés à l'international et au Laboratoire souterrain, jusqu'à des échelles pluri-métriques. L'Andra a ainsi acquis une solide connaissance des matériaux argileux gonflants et des ouvrages à base de ces matériaux. Au stade des options de sûreté, leur composant principal est un noyau à base d'argile gonflante, occupant toute la section de la descenderie et du puits et placé en contact direct avec les argilites après le retrait du revêtement/soutènement en béton.

Les configurations testées au stade du DOS ne préjugent pas de la conception des scellements qui sera *In fine* mise en œuvre au moment de la fermeture de l'installation souterraine. La solution technologique retenue au moment de la fermeture s'appuiera sur les meilleures techniques disponibles du moment et des connaissances acquises.

Bien que la mise en œuvre des opérations industrielles de fermeture apparaisse lointaine, l'Andra retient des mesures conservatoires pour permettre la mise en place de ces scellements au moment de la fermeture. Ainsi, la conception initiale de l'architecture prévoit :

- la localisation des scellements de galerie horizontale selon la contrainte mécanique la plus favorable vis-à-vis des aspects sécurité chantier ;
- la préservation de longueurs suffisantes pour pouvoir implanter les scellements.

3

L'évaluation de sûreté en exploitation

3.1 Démarche générale 60
3.2 Les risques internes nucléaires 65
3.3 Les risques d'agressions internes 76
3.4 Les risques d'agressions externes 99
3.5 Les situations retenues 104
3.6 Les évaluations des conséquences de situations accidentelles 106

3.1 Démarche générale

3.1.1 Une démarche similaire aux autres INB

En tant que concepteur et exploitant d'Installations Nucléaires de Base (INB), l'Andra doit démontrer que les dispositions techniques et les mesures humaines et organisationnelles mises en œuvre dans ses installations garantissent la protection des intérêts, c'est-à-dire la sécurité, la santé et la salubrité publiques ainsi que la protection de la nature et de l'environnement.

Ces dispositions doivent notamment permettre de prévenir les accidents et d'en limiter les conséquences pour toutes les situations et les phases de vie de l'installation (construction, exploitation, surveillance et fermeture).

Les principes, la méthodologie et les règles d'études qui sont présentés s'appuient principalement sur :

- le référentiel réglementaire : la réglementation applicable est issue de dispositions législatives codifiées, de décrets, d'arrêtés ministériels et de décisions de l'Autorité de sûreté nucléaire ;
- le référentiel non réglementaire : la plupart des règles fondamentales de sûreté (RFS) et des guides relatifs aux INB sont établis pour des installations nucléaires de surface. Certains référentiels ne sont donc pas applicables au contexte souterrain du centre de stockage.

La démonstration de sûreté est réalisée par l'Andra selon une démarche déterministe et repose sur une analyse de risques (cf. Chapitre 3.1.2 du présent document) puis sur une analyse par situations de fonctionnement (cf. Chapitre 0). Afin de juger de l'acceptabilité de chaque situation de fonctionnement, les évaluations de conséquences sont confrontées aux objectifs de protection liés aux risques radiologiques (cf. Chapitre 0 du présent document).

3.1.2 L'analyse de risques

L'analyse de l'ensemble des risques conduit à définir les dispositions techniques et organisationnelles permettant d'en assurer leur maitrise (dispositions de prévention, de protection, de limitation des conséquences). On distingue :

- les risques dits « nucléaires ». Ce sont les risques d'événements liés à la présence d'éléments radioactifs au sein des colis de déchets radioactifs. Le centre de stockage Cigéo acceptera uniquement des colis respectant l'ensemble des critères permettant de s'assurer de la sûreté de leur stockage ;
- les risques d'agressions dites « internes ». Ce sont les risques d'événements non nucléaires liés à la construction et au fonctionnement des équipements et installations, comme le risque incendie qui conduit notamment à mettre en place des systèmes d'extinction manuels ou automatiques en fonction du besoin ;
- les risques d'agressions dites « externes ». Ce sont les risques d'événements non nucléaires, naturels ou anthropiques, survenant à l'extérieur des équipements et installations (par exemple, un séisme ou une chute d'avion).

LE PANORAMA DES RISQUES EN EXPLOITATION

L'identification des risques constitue la première étape de la démarche de prévention des accidents et de limitation de leurs conséquences.

Les risques, classés selon trois grandes catégories en fonction de leur nature et de leur origine, sont les suivants :

- les risques dits « internes nucléaires ». Ce sont les risques liés à la présence de substances radioactives au sein des colis de déchets radioactifs :
  - ✓ les risques liés à la dissémination de substances radioactives ;
  - ✓ les risques liés aux rayonnements ionisants ;
  - ✓ les risques liés à la criticité ;
  - ✓ les risques liés à la thermique ;
  - ✓ les risques liés aux gaz de radiolyse.
- les risques d'agressions internes. Ce sont les risques non nucléaires liés à la construction et au fonctionnement des équipements et installations :
  - ✓ les risques liés aux opérations de manutention ;
  - ✓ les risques liés à l'incendie ;
  - ✓ les risques liés à l'explosion ;
  - ✓ les risques liés à la perte de l'alimentation électrique ;
  - ✓ les risques liés à la perte des fluides ;
  - ✓ les risques liés à la perte de la ventilation ;
  - ✓ les risques liés à la perte de la surveillance ;
  - ✓ les risques liés à la perte du contrôle commande ;
  - ✓ les risques liés à l'inondation interne ;
  - ✓ les risques liés aux substances dangereuses non radioactives ;
  - ✓ les risques liés à l'émission de projectiles et aux équipements sous pression ;
  - ✓ les risques liés au vieillissement.
- les risques d'agressions externes. Ce sont les risques non nucléaires, naturels ou anthropiques, survenant à l'extérieur des équipements et installations :
  - ✓ les risques liés à la chute d'avion ;
  - ✓ les risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication ;
  - ✓ les risques liés au séisme ;
  - ✓ les risques liés à l'inondation externe ;
  - ✓ les risques liés aux conditions météorologiques ou climatiques extrêmes ;
  - ✓ les risques liés à la foudre et aux interférences électromagnétiques ;
  - ✓ les risques liés à l'incendie externe.

3.1.3 L'analyse par situation de fonctionnement

Plusieurs situations de fonctionnement sont envisagées :

- des situations dites de fonctionnement normal et dégradé ;
- des situations incidentelles et accidentelles résultant d'une défaillance, d'un évènement interne ou externe ;
- des situations accidentelles plus sévères[21] en termes de conséquences sur l'homme résultant de cumuls d''événements ou d'événements extrêmes d'origine externe, appelées « situations du domaine d'extension du dimensionnement (cf. Encadré) »;
- de situations exclues compte tenu du nombre important de dispositions robustes ou l'interposition de barrières rendant la situation physiquement impossible.

Une fois les situations identifiées, l'analyse consiste en une évaluation des potentiels impacts, radiologiques ou non, de ces situations notamment au niveau du public. Afin de juger de l'acceptabilité de chaque situation, ces évaluations sont confrontées aux objectifs de protection liés aux risques radiologiques.

LES SITUATIONS DE DOMAINE D'EXTENSION DU DIMENSIONNEMENT

Afin de vérifier la robustesse de l'installation et de mettre en place d'éventuelles dispositions de protection complémentaires pour limiter le relâchement de substances radioactives, l'Andra analyse des situations peu vraisemblables qui pourraient conduire à une dégradation significative de l'état de l'installation et/ou au relâchement des substances radioactives à des niveaux plus importants qu'en situations accidentelles.

Ce type de situations accidentelles plus sévères, appelées « situations du domaine d'extension du dimensionnement[22] », peut survenir à la suite de défaillances multiples de dispositions de sûreté ou des aléas naturels extrêmes.

Parmi l'ensemble de ces situations, sont identifiées des situations d'urgence nécessitant la mise en place d'une organisation et des dispositions matérielles qui dimensionnent le plan d'urgence interne (PUI).

[21] Les accidents et catastrophes majeurs présentés dans l'étude d'impact correspondent à des situations accidentelles ou de situations accidentelles plus sévères.
[22] Au stade des options de sûreté, les situations de domaine d'extension du dimensionnement étaient nommées situations de dimensionnement du PUI.

3.1.4 Les évaluations de l'incidence sur l'homme

3.1.4.1 Les objectifs de protection

Pour définir les objectifs liés à la radioprotection, l'Andra s'appuie sur les recommandations, applicables aux stockages de déchets radioactifs, édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Les objectifs de radioprotection retenus pour les situations incidentelles et accidentelles, sont présentés ci-après :

Tableau 3-1 Objectifs de radioprotection retenus par l'Andra

Situations	Public/groupe de référence et environnement
Situations incidentelles	Dose inférieure à la valeur la réglementation en situation normale (< 1 mSv/incident) à long terme (intégrée sur 50 ans l'adulte et sur 70 ans pour l'enfant))
Situations accidentelles	Dose < 10 mSv/accident à long terme (intégrée sur 50 ans pour l'adulte et sur 70 ans pour l'enfant) Absence de nécessité de mesures de protection du public
Situations accidentelles plus sévères	Mesures de protection du public limitées dans le temps et dans l'espace

3.1.4.2 La méthodologie et les outils

Les calculs d'impact sont effectués à l'aide de la plateforme CERES® impact radiologique, développée par le CEA (17).

Les conséquences des situations de fonctionnement sont analysées en prenant en compte des personnes localisées à différents endroits. Il s'agit :

- des personnes situées à l'extérieur du site, à proximité de la clôture ;
- des habitants du village de Bure pour des évènements conduisant à un rejet par l'émissaire de l'installation souterraine au niveau de la zone puits ;
- des habitants du village de Saudron pour des évènements conduisant à un rejet via la cheminée ou façade du bâtiment nucléaire de surface EP1 localisé sur la zone descenderie ;

Ces localisations sont retenues dans les évaluations car les concentrations calculées sont maximales pour les populations. Il est considéré que la direction du vent, au moment de la survenue de l'évènement et pendant toute la durée du rejet, est orientée vers les localisations précisées ci-dessus.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

Afin d'évaluer les conséquences associées à des rejets de substances radioactives, il est retenu différentes voies d'exposition de l'Homme (cf. Figure 3-1) :

- une exposition liée au rejet se produisant au moment de l'évènement. Cette exposition prend en compte :
  - ✓ l'irradiation/exposition externe par immersion dans le panache (extérieur et intérieur des habitations) ;
  - ✓ l'inhalation durant le passage dans le panache (présence extérieure) ;
- une exposition liée aux dépôts de substances radioactives engendré par ce rejet :
  - ✓ l'irradiation/exposition externe secondaire due à l'activité des sols suite aux dépôts atmosphériques en extérieur ;
  - ✓ l'ingestion de produits végétaux pour lesquels l'activité résulte principalement des dépôts d'aérosols et gouttes de pluie (voie directe) mais aussi des transferts racinaires à partir du sol (voie indirecte ou racinaire), et qui conduit à une exposition interne par ingestion ;
  - ✓ l'ingestion de produits provenant d'animaux, qui ont consommé des aliments exposés.

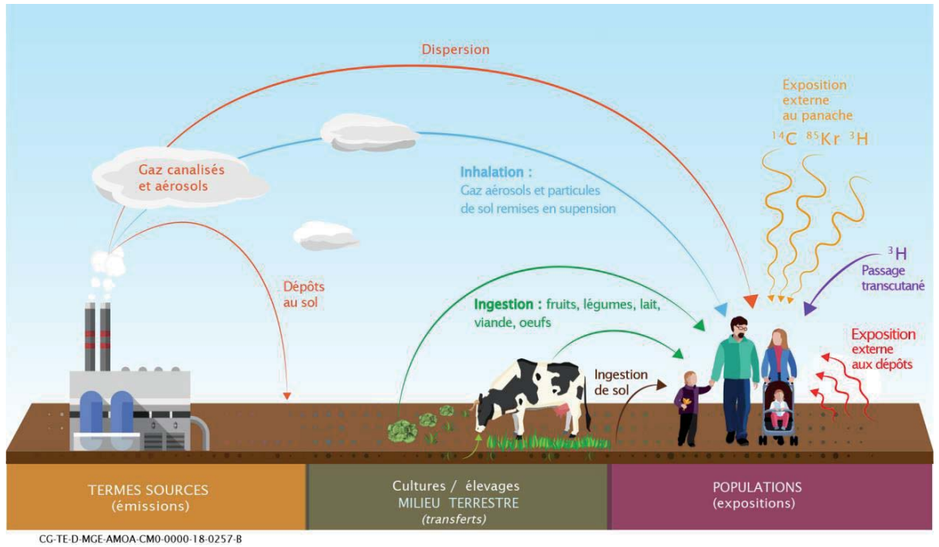


Figure 3-1 Voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques

Cette évaluation est réalisée pour une exposition du public à court, moyen et long terme :

- pour le court terme, le délai d'exposition est de 24 h ;
- pour le moyen terme, le délai d'exposition est de 1 an ;
- pour le long terme, le délai d'exposition est de 50 ans à 70 ans en fonction de la population étudiée (adulte ou enfants).

3.2 Les risques internes nucléaires

3.2.1 Les risques liés à la dissémination de substances radioactives

3.2.1.1 Description

Le risque de dissémination est lié à la présence de substances radioactives au sein des colis de déchets, matières substances à l'intérieur même des colis ou à leur surface (il est alors fait référence à la notion de contamination surfacique labile).

Le risque de dissémination de substances radioactives découle de l'éventualité, lors des opérations d'exploitation, d'une migration de ces substances radioactives vers les locaux de travail et l'environnement.

En situations de fonctionnement normal ou en mode dégradé, les risques proviennent de la présence de contamination surfacique labile des colis et emballages de transport reçus dans l'INB du centre de stockage Cigéo ainsi que des déchets solides et effluents produits lors de l'exploitation de l'installation (dénommé « déchets ou effluents d'exploitation »). Les risques proviennent également des gaz issus de certains colis de déchets MA-VL.

En situations incidentelles ou accidentelles, les risques de dissémination sont liés, soit à une défaillance intrinsèque d'une barrière de confinement, soit à une agression d'origine interne ou externe susceptible de mobiliser à minima la contamination surfacique labile externe, voire d'endommager les barrières de confinement des substances radioactives.

3.2.1.2 Localisation

Le risque de dissémination de substances radioactives concerne toutes les zones dans lesquelles des substances radioactives peuvent être présentes ou en transit (cf. Figure 2-14) en particulier :

- les locaux du bâtiment nucléaire de surface (du local de déchargement des colis de leur emballage) ;
- les liaisons surface-fond (descenderie colis pour les hottes HA et MA-VL, descenderie de service pour les fûts de déchets d'exploitation et les cuves d'effluents) ;
- les ouvrages souterrains (galeries de transfert des hottes dans la zone de soutien logistique, galeries de liaison et d'accès aux alvéoles HA et MA-VL, alvéoles MA-VL y compris les cellules de manutention, locaux de filtration et galeries de retour d'air, alvéoles HA, local d'entreposage des déchets d'exploitation).

3.2.1.3 Dispositions de maîtrise des risques

Prévention

En fonctionnement normal, c'est-à-dire en l'absence d'incident, la dispersion de substances radioactives est principalement dûe aux gaz issus de certains colis de déchets MA-VL, aux déchets et effluents radioactifs d'exploitation ainsi qu'à une remise en suspension d'éléments radioactifs potentiellement présents en surface des colis (contamination surfacique labile).

Afin de la limiter, la contamination surfacique labile des colis de déchets radioactifs est limitée au sein des installations du centre de stockage Cigéo à 4 $Bq.cm^{-2}$ en radionucléides émetteurs beta/gamma et 0,4 $Bq.cm^{-2}$ en radionucléides émetteurs alpha (application des critères adoptés par la réglementation française en matière de contamination des systèmes de transport) et contrôlée régulièrement au cours des différentes étapes de manutention.

La maîtrise du risque de dissémination de substances radioactives est assurée par l'organisation de l'installation en systèmes de confinement.

Des barrières et systèmes de confinement passifs et actifs sont mis en place entre les matières radioactives et l'environnement pour maintenir un niveau de contamination aussi faible que possible dans les locaux et pour limiter les rejets de substances radioactives à l'extérieur de l'installation.

Un premier système de confinement est conçu pour assurer un confinement aussi total que possible des substances radioactives de manière à éviter une dissémination de la radioactivité dans les zones de circulation du personnel et dans l'environnement. Il comprend au moins une barrière statique de confinement. Elle est assurée par le colis pour les déchets HA ou MA-VL ainsi que par les équipements en contact direct des déchets et effluents d'exploitation.

Un second système de confinement, lorsqu'il est requis dans la démonstration de sûreté (en tout point où la continuité du premier système de confinement ne peut être totalement garantie), peut être constitué de barrières statiques complémentaires (notamment les hottes de transfert MA-VL) et, le cas échéant, de barrières dynamiques, selon les zones de l'installation et les procédés mis en jeu.

Le confinement dynamique permet de pallier les éventuels défauts d'étanchéité du confinement statique de ce deuxième système de confinement. Il est assuré par le système de ventilation et sa filtration à Très Haute Efficacité (THE), qui impose un sens de circulation d'air et maintient une dépression à l'intérieur des zones contrôlées présentant un risque potentiel de contamination radioactive. Cette dépression permet d'éviter des rejets vers l'extérieur en retenant plus de 99 % des aérosols radioactifs.

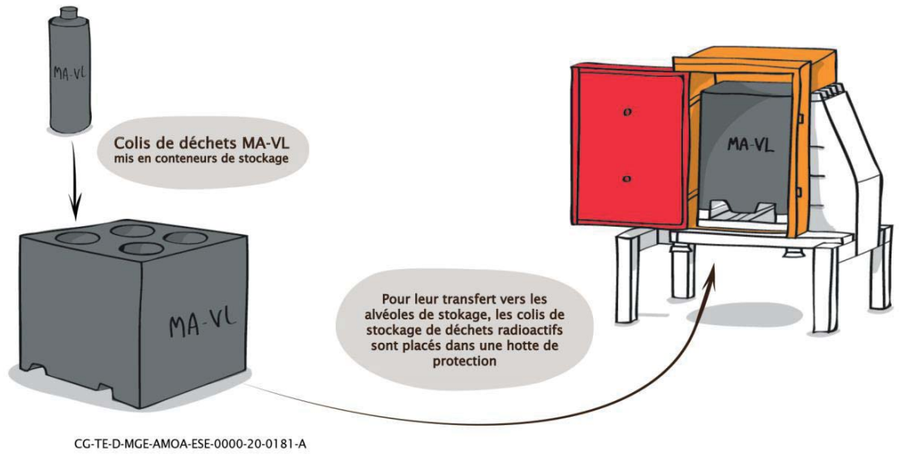


Figure 3-2 *Illustration de colis de stockage déchets radioactifs MA-VL placés en hotte pour leur transfert vers l'installation souterraine*

a) Surveillance

La première barrière de confinement statique est surveillée au travers de contrôles des colis dès la réception puis dans le bâtiment nucléaire de surface avant transfert dans l'installation souterraine et d'une surveillance radiologique des locaux dans lesquels transitent, sont entreposés ou stockés les colis de déchets radioactifs.

Le confinement dynamique est surveillé par l'intermédiaire :

- des paramètres de la ventilation et notamment par la surveillance des niveaux de dépression dans les locaux ;
- de la surveillance en continu et en différé de la contamination atmosphérique ambiante. Les dispositifs de mesure dont de deux types :
  - ✓ les balises de surveillance de la contamination atmosphérique (mesure en temps réel) couplées avec des alarmes ;
  - ✓ la mesure indirecte via un système d'aspiration sur un filtre ou une cartouche (mesure en différé).

b) Limitation des conséquences

Le premier système de confinement assure le confinement des substances radioactives en fonctionnement normal et en mode dégradé de l'installation.

En situations accidentelles mettant en défaut le premier système de confinement, le second système permet de limiter les conséquences de la perte du premier système de confinement, le second système étant dimensionné aux agressions internes et externes.

Pour les colis de déchets HA, la robustesse des colis (matrice vitreuse) et les exigences de dimensionnement associées permettent d'exclure la dégradation de la fonction de confinement portée par les colis primaires et les colis de stockage lors des opérations de mise en stockage ou dans l'alvéole de stockage une fois le colis stocké jusqu'à la fin de la phase de fonctionnement.

Pour les colis de déchets MA-VL, en cas accidentel de défaillance ou d'altération du système de confinement constitué par les colis de stockage, la limitation des conséquences est assurée par le second système de confinement. Ce second système de confinement peut être constitué d'une barrière de confinement statique, c'est le cas des hottes de transfert MA-VL lors des transferts des colis de déchets MA-VL en vue de leur mise en stockage.

Le second système de confinement peut également être constitué d'une barrière de confinement statique complétée par un système de confinement dynamique. Dans cette configuration, la barrière de confinement statique est constituée du génie civil des locaux, les traversées et les équipements passifs du réseau de ventilation. Le confinement dynamique est réalisé par la mise en place d'une ventilation intégrant des cascades de dépression. La conception de la ventilation est réalisée de manière proportionnée aux risques de dissémination de substances radioactives pouvant être présentes dans les installations du centre de stockage Cigéo.

Les évaluations des conséquences des situations accidentelles liées à une perte de confinement du premier système de confinement sont présentées au chapitre 3.6 du présent document.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

La maitrise des risques de dissémination des substances radioactives

La maîtrise des risques lié à la dissémination de substances radioactives est assurée par :

- des barrières et systèmes de confinement passifs et actifs qui sont mis en place entre les matières radioactives et l'environnement pour maintenir un niveau de contamination aussi faible que possible dans les locaux et pour limiter les rejets de substances radioactives à l'extérieur de l'installation dans toutes les situations ;
- le colis qui constitue un système de confinement ;
- les différents locaux et zones dans lesquels transitent ou sont stockés les colis qui peuvent constituer un système de confinement complémentaire et indépendant en fonction des risques de dissémination qu'ils présentent. Ainsi, en cas de situation accidentelle conduisant à l'endommagement de l'un des systèmes, le deuxième système permet d'assurer le maintien de la fonction de protection.

3.2.2 Les risques liés aux rayonnements ionisants

3.2.2.1 Description

Le risque d'exposition aux rayonnements ionisants peut être d'origine interne ou externe.

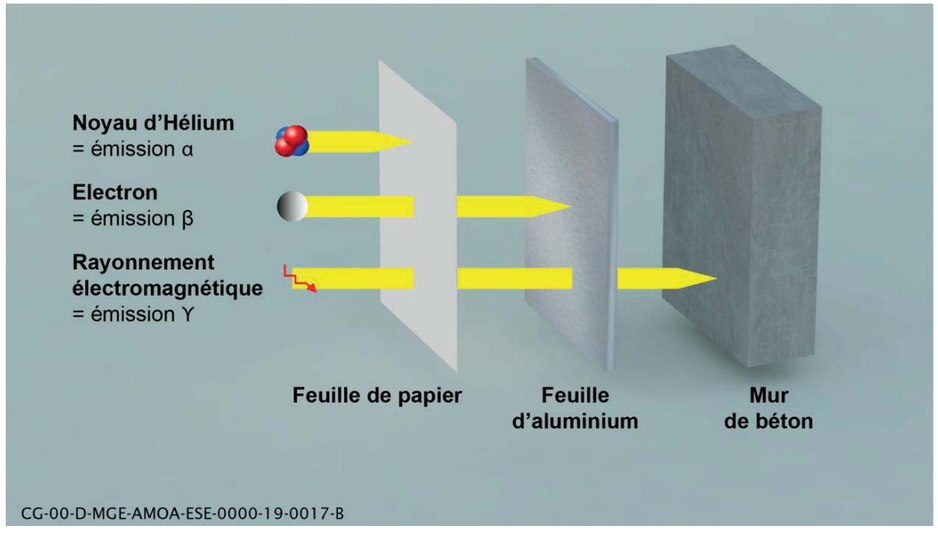


Figure 3-3 Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements ionisants

L'exposition externe peut résulter de l'exposition à des substances radioactives émettrices de rayonnements ionisants contenues dans les colis de déchets ou dans les déchets issus de l'exploitation de l'installation (déchets solides, effluents liquides ou gazeux).

Pendant la phase de fonctionnement, les opérations sur les colis s'effectuent majoritairement à distance et permettent ainsi d'éviter l'exposition des opérateurs à des rayonnements ionisants. Les opérations qui peuvent entrainer un risque d'exposition sont principalement liées à la réception et au déchargement des convois, à la préparation et déchargement des emballages) et les opérations de contrôles de colis et de surveillance.

En situation incidentelle ou accidentelle, les risques sont liés à des interventions exceptionnelles dans des locaux où l'ambiance radiologique pourrait être augmentée, par rapport à la situation normale, du fait de la dégradation d'une protection contre les rayonnements ionisants.

Dans le cas de ***l'exposition interne***, la source de rayonnements ionisants est à l'intérieur de l'organisme : c'est le résultat de l'ingestion ou de l'inhalation de substances radioactives.

Le risque d'exposition interne en fonctionnement normal est essentiellement lié à la mise en suspension et aux transferts par contact de la contamination présente à la surface extérieure des emballages de transport, des colis primaires de déchets ou des colis de stockage. Ce risque est très faible sur les installations du centre de stockage Cigéo car le niveau de contamination sur les éléments précités ne dépasse pas les limites fixées de 4 Bq/cm^2 pour les bêta-gamma et 0,4 Bq/cm^2 pour la contamination alpha[23]. Le respect de cette limite fait l'objet de contrôle systématique sur l'installation.

En situation incidentelle/accidentelle, le risque d'exposition interne est essentiellement lié à la rupture du confinement des colis de déchets.

3.2.2.2 Localisation

Le risque d'exposition aux rayonnements ionisants concerne principalement les locaux dans lesquels transitent les colis de déchets HA et MA-VL (cf. Figure 2-14). Ces locaux sont donc situés dans le bâtiment nucléaire de surface en zone descenderie, et dans l'installation souterraine.

Le risque d'exposition aux rayonnements ionisants concerne dans une moindre mesure, les locaux contenant des sources de contrôle et d'étalonnage des matériels de contrôle et de surveillance radiologique, les filtres des systèmes de ventilation susceptibles de capter des aérosols radioactifs et les déchets induits par l'exploitation.

3.2.2.3 Dispositions de maîtrise du risque

a) Prévention

Conformément à la réglementation sur la protection des travailleurs contre les rayonnements ionisants, les principes de limitation des expositions individuelles et d'optimisation de la dose collective sont appliqués.

La maîtrise des risques liés aux rayonnements ionisants est ainsi assurée par le zonage radiologique de l'installation, le respect de la réglementation relative à la radioprotection des travailleurs et le principe d'optimisation (principe ALARA[24]), qui consiste à prendre toutes les dispositions raisonnablement possibles pour minimiser l'exposition des personnes.

Vis-à-vis de l'exposition externe, les dispositions de prévention similaires à d'autres installations nucléaires sont :

- les spécifications d'acceptation des colis de déchets, et les contrôles de vérification à réception sur le centre de stockage qui permettent de s'assurer que les conditions d'exposition des opérateurs sont respectées ;
- la mise en place de dispositifs de protection radiologique assurés par un dimensionnement du génie civil (murs des bâtiments et ouvrages) et d'équipements (emballages de transport, portes et hottes de transfert des colis de déchets, façades d'accostage des alvéoles de stockage de déchets MA-VL, bouchons de radioprotection des alvéoles de stockage de déchets HA, etc.). Le dimensionnement (matériaux, épaisseurs) de ces protections radiologiques est adapté aux caractéristiques radiologiques des colis, et au temps de présence associées aux postes de travail ;
- le choix d'une conception privilégiant le recours à des opérations déportées (éloignement du personnel des sources radioactives) ou automatisées et supervisées à distance depuis la salle de

[23] Ces limites correspondent aux limites fixées dans la réglementation pour les transports sur route ou par convois ferroviaires.
[24] As Low As Reasonably Achievable.

conduite centralisée (opérations réalisées directement sur les colis primaires (déchargement des emballages de transport, confection des colis de stockage) ou sur les colis de stockage (entreposage des colis, transfert et mise en alvéole de stockage, etc.) ;

- l'interdiction d'accès aux cellules et locaux contenant des colis (maintenus fermés mécaniquement et accès conditionné aux débits de dose ambiants régnant dans la cellule),avec la mise en place d'un zonage[25].

En tout état de cause, l'exposition des personnes ne peut dépasser les limites réglementaires. Une évaluation préliminaire dosimétrique permet de vérifier que la conception des installations et le dimensionnement des protections radiologiques permettent de limiter la dose individuelle des travailleurs à une valeur inférieure à l'objectif de dose de 5 mSv.an^{-1} que l'Andra s'est fixée. Cette valeur est inférieure à la limite réglementaire de 20 mSv.an^{-1} définie par le code du travail[26].

b) Surveillance

Le type de balises mises en œuvre pour la surveillance de la contamination ou de l'exposition externe (mesure en temps réel, en différé, de la contamination ou du débit de dose) est dépendant de la localisation des postes de travail, du process et des risques identifiés au sein de ces zones. Elles sont couplées avec des alarmes (visuelles, sonores) permettant de prévenir l'opérateur.

- Surveillance des locaux :
  - ✓ la surveillance des locaux repose sur un réseau de balises fixes de surveillance du débit de dose gamma implantées dans les zones de travail fréquentes pour les travailleurs, soumises à des variations du débit de dose ambiant ;
  - ✓ des balises de surveillance de la contamination atmosphérique (aérosols) avec signalisation intégrée sont positionnées à poste fixe ;
  - ✓ dans les locaux à risques ponctuels ou pour réaliser des interventions particulières, des balises mobiles peuvent être raccordées à des boîtes de jonction reliées au système de centralisation de la surveillance radiologique (TCR) ;
  - ✓ les différents appareils déclenchent des alarmes sonores et lumineuses locales avec report au TCR, en cas de dépassement de seuil (alerte ou alarme) ou en cas de mauvais fonctionnement.
- Surveillance des opérateurs :

  Les opérateurs sont munis d'équipements adaptés et soumis à un contrôle médical régulier. Chaque personne intervenant en zone surveillée ou contrôlé est munie de dosimètres. Ces derniers permettent de connaitre la dose reçue lors des différentes interventions.

c) Limitation des conséquences

Les principales dispositions pour limiter les conséquences en termes d'exposition externe et interne reposent sur des modalités d'intervention adaptées (protection du personnel intervenant en cas de contamination, intervention du service de radioprotection).

La gestion de situations de blocage du procédé ou de situations accidentelles a été intégrée dans le processus de conception de l'installation. Ceci a conduit à la définition de dispositions particulières comme par exemple des moyens téléopérés ou robotisés pour l'évacuation des sources radiologiques ou le déport d'équipements (moteurs, armoires électriques…) afin de permettre des interventions derrière des protections radiologiques.

[25] La définition du zonage radiologique s'appuie comme pour toute autre installation nucléaire sur la réglementation notamment l'article R. 4451-18 du code du travail et l'arrêté du 15 mai 2006, relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et spécialement réglementées ou interdites.
[26] Selon l'Article R. 4451-6 du code de travail

La maitrise des risques liés aux rayonnements ionisants

La maitrise des risques liés aux rayonnements ionisants est assurée par :

- des contrôles de non contamination labile et de débit d'équivalent de dose des colis de déchets à réception ;
- les recours privilégiés à des opérations déportées pour le stockage des colis de déchets ;
- la mise en place de protections radiologiques dont le dimensionnement (matériaux, épaisseurs) est adapté aux caractéristiques radiologiques des colis.

Une évaluation préliminaire dosimétrique basée sur la conception de l'installation permet de vérifier que la dose individuelle reçue par les travailleurs sera inférieure à l'objectif de dose de 5 mSv par an.

3.2.3 Les risques liés à la criticité

3.2.3.1 Description

Le risque de criticité est le risque d'occurrence d'une réaction de fission en chaîne divergente au sein d'un milieu fissile. Cette réaction est liée au fait que certains éléments présents dans les colis de déchets, comme l'isotope ^{235}U ou les isotopes ^{239}Pu et ^{241}Pu, présentent la propriété de pouvoir fissionner.

La masse moyenne de matières fissiles (Uranium et Plutonium) dans la plupart des colis de déchets est relativement limitée (en moyenne de l'ordre de quelques dizaines de grammes). Il est à noter que les colis primaires de déchets reçus sur l'installation sont conçus et produits afin d'être sûrs du point de vue de la criticité de façon isolée ainsi que dans les conditions d'entreposage chez les producteurs.

3.2.3.2 Localisation

Le risque de criticité concerne toutes les zones dans lesquelles les colis de déchets contenant des matières fissiles transitent, sont entreposés, manipulés ou stockés.

L'analyse de sûreté-criticité porte sur les emplacements et les trajets où la présence et la mise en œuvre de matières fissiles sont autorisées. Dans ces zones, la sûreté est garantie par la limite d'un ou plusieurs paramètres de contrôle du risque de criticité.

Les emplacements et trajets ainsi définis sont les suivants :

- réception et mise à disposition des Emballages de Transport (ET) ;
- déchargement des ET ;
- entreposage tampon des colis ;
- transfert en hotte des colis ;
- alvéole de stockage.

3.2.3.3 Dispositions de maîtrise du risque

a) Prévention

Pour chaque partie de l'installation, un mode de contrôle de la criticité est défini par une limite imposée à l'un ou plusieurs des paramètres suivants :

- la masse de matières fissiles des colis de déchets. La prise en charge d'un colis primaire en provenance des producteurs est subordonnée au respect de ces limites fixées dans les spécifications d'acceptation des colis ;
- la géométrie des colis de déchets et de chaque zone d'entreposage ou de chaque alvéole de stockage.

L'analyse des différentes configurations associées aux opérations de mise en stockage des colis de déchets permettent de montrer que le risque de criticité est maitrisé.

b) Surveillance

Le respect des masses maximales admissibles et de la géométrie (cotes) est assuré par un processus d'acceptabilité des colis qui encadre la maîtrise de la qualité des colis destinés à être stockés.

Les moyens de contrôle mis en place sur les colis chez les producteurs ou sur le centre de stockage Cigéo sont les suivants :

- comptabilité des matières fissiles via un logiciel de traçabilité ;
- contrôle dimensionnel des géométries des colis ;
- vérification des conditions d'entreposage ;

c) Limitation des conséquences

Des situations accidentelles telles qu'une chute de colis, un incendie, une inondation ou un séisme ont fait l'objet d'analyses afin de garantir la maîtrise de la sûreté-criticité. Il est démontré que le risque d'accident de criticité est exclu dans de telles situations.

En outre, des balises d'irradiation positionnées dans différentes zones permettent d'écarter les risques de surexposition du personnel.

La maitrise des risques liés à la criticité

La maitrise des risques liés à la criticité est assurée par :

- la limitation de la masse de matières fissiles des colis de déchets ;
- la maitrise de la géométrie des colis de déchets ;
- la maitrise de la géométrie des zones d'entreposage tampon et des alvéoles de stockage de l'installation.

3.2.4 Les risques liés à la thermique

3.2.4.1 Description

Le dégagement thermique des colis de déchets HA et de certains colis de déchets MA-VL est lié aux substances radioactives contenues dans ces colis qui émettent des rayonnements conduisant à une production de chaleur.

Ce dégagement thermique est susceptible de dégrader les propriétés des bétons du génie civil, d'entraîner le dysfonctionnement d'équipements électroniques et de créer des conditions d'ambiance à proximité des locaux contenant les colis non acceptables pour le personnel.

3.2.4.2 Localisation

Le risque de dégagement thermique concerne tous les locaux contenant des colis de déchets radioactifs et tous les équipements situés à leur proximité. Il est plus important dans les zones dans lesquelles les colis de déchets sont nombreux ainsi que dans les espaces non ventilés et de faible volume.

3.2.4.3 Dispositions de maîtrise du risque

a) Prévention

Les dispositions de prévention pour la maîtrise du risque lié à la thermique sont :

- la connaissance et la limitation de la puissance thermique des colis reçus sur le site de stockage, notamment ceux fortement exothermiques comme les HA, par l'entreposage préalable sur leur site de production ;
- le respect de la conception et le choix des matériaux utilisés pour les colis de stockage ainsi que pour les locaux contenant les colis de déchets et leurs équipements ;
- la conception des alvéoles permettant l'évacuation de la chaleur dégagée par les colis de déchets HA et MA-VL de manière passive par conduction ;
- la mise en place de procédures pour limiter le temps de présence des colis dans les hottes de transfert en cas d'immobilisation de celles-ci.

b) Surveillance

Pour pouvoir être acceptés sur le centre de stockage, les colis devront respecter les exigences en termes de puissance thermique qui leur seront spécifiées. Une surveillance est menée en amont par l'Andra sur les installations des producteurs.

Les locaux et alvéoles contenant des colis de déchets sont équipés de capteurs pour la surveillance de la température ambiante. Des sondes thermiques sont ainsi mises en œuvre, elles surveillent la température et signalent les évolutions de cette dernière.

c) Limitation des conséquences

Les dispositions de limitation des conséquences concernent essentiellement la ventilation mise en œuvre dans les différents locaux pour maîtriser d'autres risques que le risque lié à la thermique mais qui contribue à l'évacuation de la puissance thermique des colis.

En cas d'arrêt des équipements de transfert des hottes contenant des colis de déchets, la conception des équipements permet la dépose de la hotte et la reprise de cette dernière par un autre équipement pour effectuer la fin du cycle d'exploitation et l'extraction du colis de la hotte.

La maitrise des risques liés à la thermique

La maitrise des risques liées à la thermique est assurée par :

- une puissance thermique limitée des colis ;
  - ✓ Pour les colis de déchets HA exothermiques, arrivée des colis sur le centre de stockage après avoir été entreposés suffisamment longtemps pour que leur puissance thermique ait décru (environ 2080) ;
- un dimensionnement de l'installation pour respecter les températures maximales admissibles des structures et équipements ;
- l'évacuation du dégagement thermique des colis de déchets HA et de certains colis de déchets MA-VL de manière passive lors des opérations de stockage des déchets.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

3.2.5 Les risques liés aux gaz de radiolyse

Les risques liés aux gaz de radiolyse sont analysés au regard de la prévention des explosions dans l'INB du centre de stockage Cigéo.

En effet, lorsque de l'hydrogène est présent dans une installation, il convient de prendre en compte le risque de formation d'atmosphère explosive. Une « atmosphère explosive » est « un mélange avec l'air, dans des conditions atmosphériques, de substances inflammables, sous forme de gaz ou de poussières, dans lequel, après inflammation, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé ».

Pour qu'une explosion se produise, les conditions suivantes doivent à minima simultanément être réunies :

- la présence d'un gaz (ex : hydrogène), dont la concentration est telle qu'il se trouve dans son domaine d'explosivité (compris entre la Limite Inférieure d'Explosivité et la Limite Supérieure d'Explosivité) ;
- la présence d'un comburant (généralement, l'oxygène de l'air) ;
- la présence d'une source d'ignition (étincelle, frottement, température du milieu ou de paroi supérieure à la température d'auto-inflammation du gaz considéré).

3.2.5.1 Description

Le phénomène de radiolyse provient de la présence de matières hydrogénées dans les colis de déchets. Par effet des rayonnements ionisants, des gaz de radiolyse (principalement de l'hydrogène H_2 et en plus faible proportion du méthane CH4, du monoxyde et dioxyde de carbone CO et CO2) peuvent être produits.

Certains déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) contiennent des molécules d'eau, ce qui provoque un dégagement d'hydrogène. Celui-ci est dû à une réaction, la radiolyse, qui se produit lorsque le rayonnement des particules radioactives issues des déchets vient casser les molécules d'eau, entraînant un dégagement de ce gaz. Les déchets HA ne sont pas concernés par l'émission de gaz de radiolyse (matrice de verre).

3.2.5.2 Localisation

Les zones associées aux risques liés aux gaz de radiolyse sont celles dans lesquelles il existe :

- un regroupement important de colis émetteurs de gaz de radiolyse comme dans les zones tampons du bâtiment nucléaire ou encore les alvéoles de stockage MA-VL ;
- des colis émetteurs de gaz de radiolyse se trouvant dans un volume réduit, comme dans les hottes de transferts des colis de déchets MA-VL.

3.2.5.3 Dispositions de maîtrise des risques

a) Prévention

La maitrise des risques liés aux gaz de radiolyse est assurée par le contrôle de la concentration en hydrogène dans l'atmosphère et par la mise en place de dispositions permettant de garantir que cette concentration sera toujours inférieure aux concentrations rendant le mélange explosif (concentrations définies pour chaque type de gaz).

Dans le cas de l'hydrogène, le domaine d'explosivité se situe entre 4 % (Limite Inférieure d'Explosivité, LIE) et 75 % en volume dans l'air à pression normale et température ambiante. Ainsi, le maintien d'une concentration en hydrogène inférieure à 4 % permet d'exclure le risque.

Pour maintenir ces conditions hors du domaine d'explosivité, les principales dispositions de prévention mises en œuvre sont les suivantes :

- la limitation à la source de la quantité d'hydrogène dégagée par les colis de déchets MA-VL via les spécifications d'acceptation des colis de déchets radioactifs sur le centre de stockage Cigéo ;
- le maintien, en fonctionnement normal, d'une concentration en hydrogène inférieure à 1 % (soit ¼ de la LIE de l'hydrogène) au moyen :
  - ✓ **cas du bâtiment nucléaire de surface « EP1 »** : de la dilution de l'hydrogène dans l'air ambiant en concevant des cellules de grands volumes. Ainsi, dans ces cellules, même en l'absence de système de ventilation, les délais d'atteinte du taux limite en hydrogène (1 % en fonctionnement normal) est extrêmement long, de l'ordre de dizaines voire centaines d'années (dispositions constructives passives) ;
  - ✓ **cas des hottes MA-VL** : du transit unitaire et de la limitation du temps de séjour d'un colis de déchets MA-VL dans sa hotte (dégagement d'hydrogène insuffisant en fonctionnement normal pour conduire à l'apparition d'une atmosphère explosive) ;
  - ✓ **cas des alvéoles de stockage MA-VL** : le système de ventilation favorise le brassage et la dilution des gaz de radiolyse afin d'éviter la création de zones mortes et d'évacuer les gaz de radiolyse. Les débits d'air traversant les alvéoles permettent de vérifier que la concentration en hydrogène reste inférieure à 1 %.

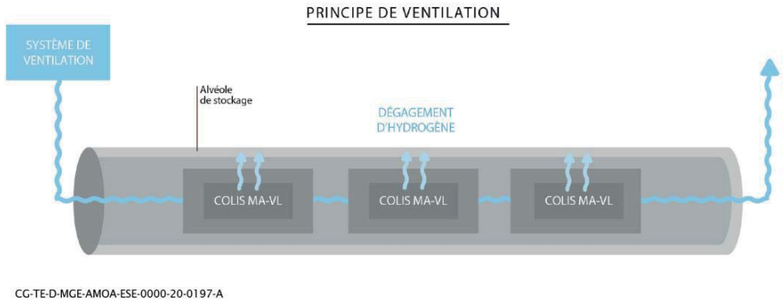


Figure 3-4 Illustration du principe de ventilation en alvéole MA-VL

b) Surveillance

Des capteurs de la concentration d'hydrogène dans l'air ambiant sont installés dans les zones exposées. Ils visent à vérifier :

- en fonctionnement normal ou dégradé : que 25 % de la LIE de l'hydrogène (soit 1 % d'hydrogène) n'est pas atteint ;
- en situations incidentelles ou accidentelles : que 75 % de la LIE de l'hydrogène (soit 3 % d'hydrogène) n'est pas atteint.

Différentes alarmes sont associées à l'atteinte de ces seuils et sont remontées en Salle de Conduite Centralisée pour permettre aux équipes d'exploitation d'intervenir.

Par ailleurs, un dispositif de surveillance détecte toute anomalie dans le fonctionnement de la ventilation et de l'évacuation de l'hydrogène.

c) Limitation des conséquences

Des situations accidentelles telles qu'une perte prolongée de la ventilation en alvéole de stockage MA-VL ou d'immobilisation prolongée de la hotte de transfert MA-VL ont fait l'objet d'analyses afin de garantir la maîtrise des risques liés aux gaz de radiolyse. Il en ressort les conclusions suivantes :

- **cas du bâtiment nucléaire de surface « EP1 »**

  Compte-tenu des échelles de temps associées à l'atteinte des taux limites en hydrogène (plusieurs dizaines voire centaines d'années), aucune situation accidentelle n'est susceptible de remettre en cause la maîtrise des risques liés aux gaz de radiolyse dans les cellules du bâtiment nucléaire de surface.
- **cas des hottes de transfert MA-VL**

  En cas de blocage prolongé de la hotte de transfert des colis MA-VL, un dispositif de dégazage est mis en œuvre et peut à tout moment y être connecté afin de procéder à sa purge.
- **cas des alvéoles de stockage MA-VL**

  Des dispositions de conception sont retenues afin d'éviter la perte prolongée de la ventilation : redondance des ventilateurs et des moyens d'alimentation, capacité de rétablissement de la ventilation à la suite d'une agression interne ou externe. L'Andra retient cependant la possibilité d'une rupture de l'alimentation électrique de la ventilation susceptible d'entraîner une augmentation progressive de la concentration d'hydrogène en alvéole MA-VL.

  Au stade du DOS, les analyses montrent qu'en l'absence de ventilation, la concentration limite en hydrogène (3 % soit 75 % de la LIE) serait atteinte sous environ cinq semaines, correspondant au délai disponible pour mettre en œuvre les dispositions permettant de rétablir la ventilation.

La maitrise des risques liés aux gaz de radiolyse

La maitrise des risques liés aux gaz de radiolyse émis par les colis de déchets est assurée principalement par :

- le respect de seuils exprimés en taux de dégazage d'hydrogène qui sont imposés aux colis. Leur acception sur le centre est conditionnée au respect de ces seuils ;
- la mise place d'une ventilation dans les alvéoles de stockage MA-VL et la surveillance de son bon fonctionnement permettant de maintenir la concentration d'H_2 à un niveau bien inférieur au seuil d'explosivité. En cas de panne de la ventilation, les dispositifs de secours permettent sa réparation bien avant l'atteinte de la limite d'explosivité.

3.3 Les risques d'agressions internes

3.3.1 Les risques liés aux opérations de manutention

3.3.1.1 Description

Les opérations de manutention sur le centre de stockage de Cigéo sont des opérations de levage, de transfert et de poussée de charges contenant des substances radioactives. La chute, le renversement ou la collision d'une charge est susceptible d'entraîner :

- un risque de dispersion de substances radioactives en cas de rupture de barrières de confinement (la charge elle-même ou un élément assurant le confinement impacté par la chute d'une charge) ;
- une exposition externe du personnel en cas de dégradation des performances des protections radiologiques ;
- une perte d'un équipement assurant une fonction de protection de l'installation.

Ces charges sont manutentionnées au moyen de différents types d'équipements dont les principaux utilisés sur le centre de stockage Cigéo sont :

- les **équipements de levage** : les ponts de manutention et les tables élévatrices ;
- les **équipements de transfert guidé sur rails** : les chariots de transfert de surface et de fond, les transbordeurs, le système de transfert des colis primaires, les navettes de surface, les navettes HA et MA-VL , le funiculaire, les tables d'accostage, les tables de chargement et de réception ;
- les **équipements spécifiques de mise en stockage** : le pont stockeur, le robot pousseur.

Les figures ci-dessous donnent une illustration de type d'équipements cités ci-avant (ponts de manutention et pont stockeur de colis MA-VL).

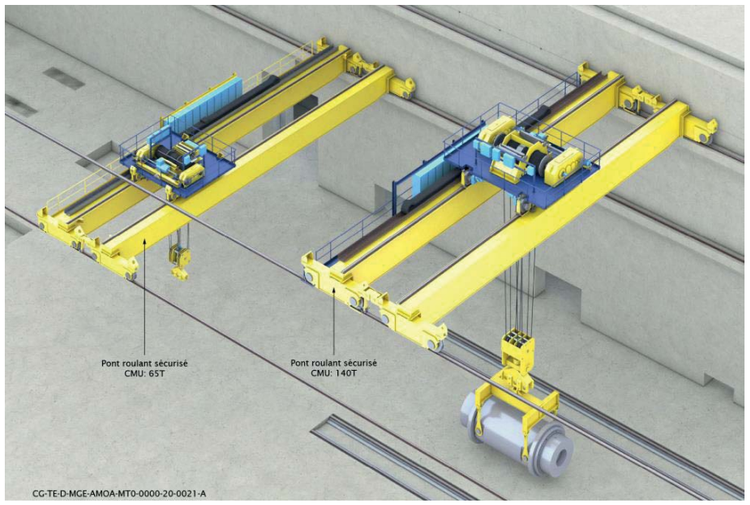


Figure 3-5 Illustration de ponts roulants sécurisés

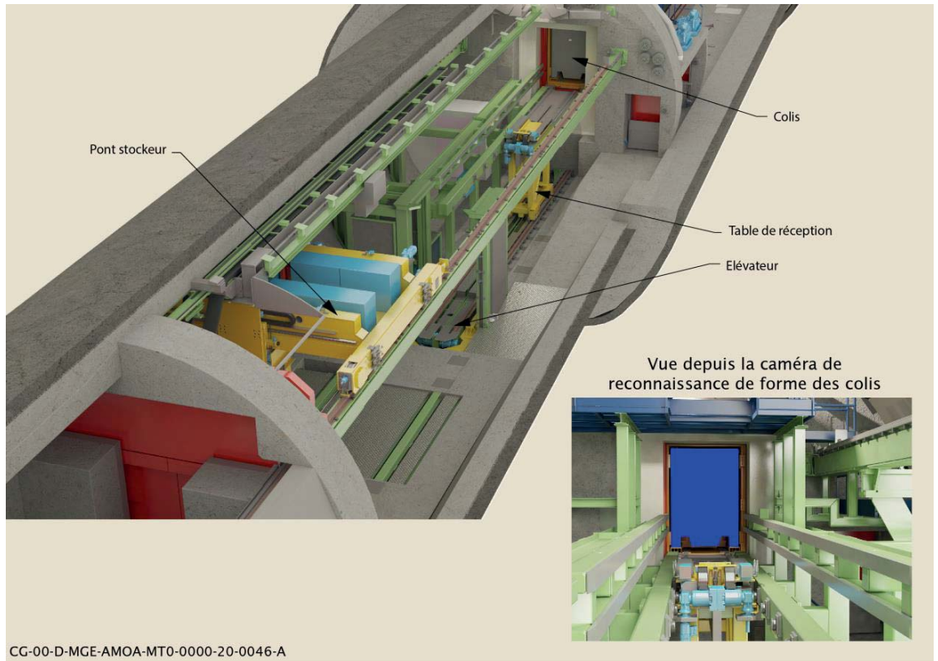


Figure 3-6 Illustration du pont stockeur de colis de déchets MA-VL

3.3.1.2 Localisation

Depuis la réception des emballages de transport jusqu'à la mise en alvéole des colis de stockage, les charges contenant des substances radioactives manutentionnées se présentent notamment sous les formes suivantes :

- des emballages de transport contenant les colis primaires ;
- des colis de déchets primaires ;
- des colis de stockage ;
- des hottes de transfert contenant des colis de stockage ;
- des déchets/effluents induits par les opérations d'exploitation.

Les risques liés aux opérations de manutention concernent toutes les zones traversées par des équipements, c'est-à-dire toute l'installation nucléaire.

3.3.1.3 Dispositions de maîtrise des risques

a) Prévention

Les dispositions de prévention associées aux risques liés aux opérations de manutention sont les suivantes :

- des opérations de transfert réalisées à l'aide d'équipements guidés sur rails ;
- une sécurisation des mouvements, des chaines de levage et des mouvements de translation afin d'assurer un maintien sécurisé de la charge manutentionnée en cas de survenue d'une défaillance ou agression ;
- des vitesses de transfert faibles et limitées ;

- des systèmes de freinage redondés à sécurité positive et dimensionnés pour que la distance d'arrêt et la décélération liées au freinage soient compatibles avec la qualification de la charge manutentionnée.

» SÉCURITÉ POSITIVE

Un équipement est dit « à sécurité positive » lorsqu'une perte du fluide moteur (dont électricité) ou des utilités conduit l'équipement à se mettre en situation sécuritaire stable et maintenue dans le temps.

À titre d'exemple, une attention particulière est apportée sur le transfert des colis de stockage depuis la surface vers l'installation souterraine au moyen d'un transfert incliné dans la descenderie de l'installation nucléaire par funiculaire :

- le funiculaire est un équipement de manutention au sol circulant en ligne droite sur des rails selon une pente de 12 % sur 4 kms ;
- le câble du funiculaire est entraîné de manière redondante par deux poulies motrices, chaque poulie pouvant reprendre l'intégralité de la masse du funiculaire chargée de la hotte contenant le colis de stockage ;
- il est équipé de systèmes anti-soulèvement empêchant son déraillement. Comme pour les autres moyens de transferts, sa vitesse est faible et limitée ;
- le système de freinage du funiculaire comprend quatre systèmes, qui se déclenchent successivement en cas de défaillance du précédent :
  - ✓ deux systèmes de freinage à pinces (freins de service et des freins de secours) ;
  - ✓ un système de freinage à mâchoires (frein d'arrêt d'urgence) ;
  - ✓ un système de freinage par affaissement (frein d'ultime secours).
- des rampes de décélération sont mises en place à l'approche des différentes zones d'arrêt. De plus des zones de sécurité sont également présentes aux deux extrémités afin d'écarter tout risque de collision avec le génie civil des installations.

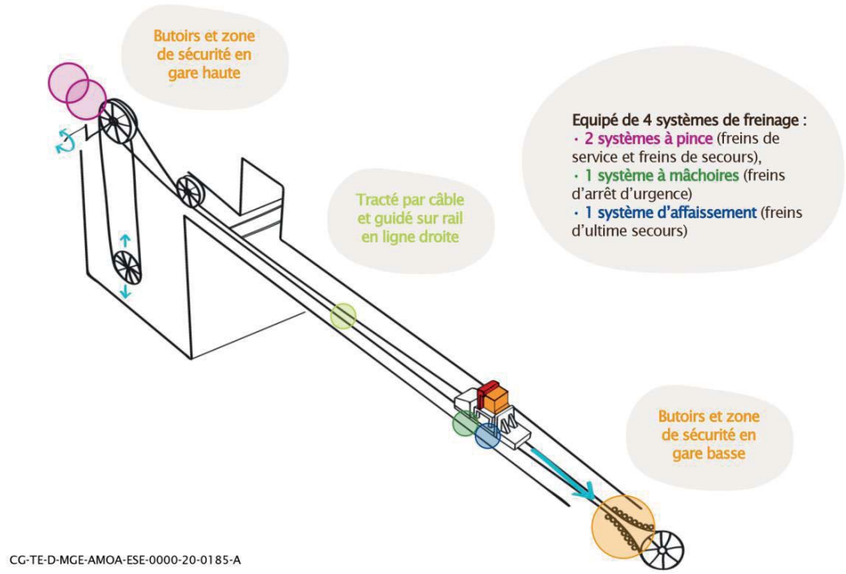


Figure 3-7 Illustration des dispositifs du transfert incliné par funiculaire

b) Surveillance

Les équipements de manutention sont équipés de moyens de surveillance visant à s'assurer du maintien des différents paramètres surveillés dans une plage de valeur autorisées et à en détecter toute sortie.

Les paramètres surveillés via les capteurs sont notamment :

- la position ;
- la vitesse de déplacement ;
- les fins de courses ;
- la détection d'obstacles.

Dans le cas d'une sortie d'un des paramètres surveillés de sa plage de fonctionnement normal, les mouvements de l'équipement de manutention sont arrêtés et une alarme est reportée aux opérateurs situés au niveau de la salle de conduite centralisée. Les alertes sont transmises en salle de conduite centralisée de manière à pouvoir intervenir, au plus tôt, sur le moyen défaillant et ainsi assurer le retour au fonctionnement normal.

Le procédé et les équipements font l'objet d'une surveillance vidéo dont le flux est transmis en salle de conduite centralisée. Une commande d'arrêt d'urgence des équipements procédé est également présente sur les pupitres de la salle de conduite centralisée.

Enfin, les équipements de manutention sont soumis à un programme de maintenance, élaboré en tenant compte des retours d'expérience de l'industrie nucléaire.

c) Limitation des conséquences

Dans la majorité des situations, la manutention des colis de déchets est limitée à des hauteurs inférieures à leur qualification à la chute. Des dispositifs de type tables, platelages ou matelas amortisseurs sont disposés spécifiquement afin de limiter la hauteur potentielle de chute. Ces dispositifs sont conçus afin de pouvoir reprendre la charge correspondant à l'intégralité de la masse des colis de déchets en cas de chute.

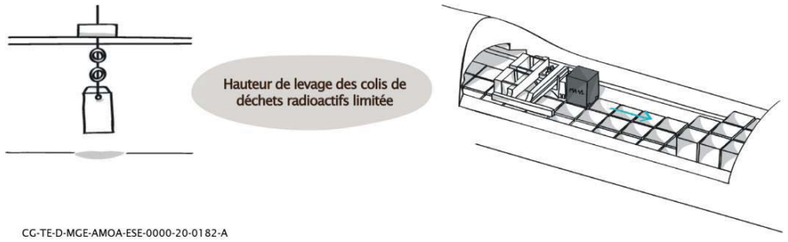


Figure 3-8 *Illustration de la manutention des colis de déchets radioactifs MA-VL à faible hauteur*

S'agissant du risque de collision, les équipements de transfert sont dimensionnés afin de limiter l'énergie des collisions à des seuils inférieurs aux qualifications des charges manutentionnées.

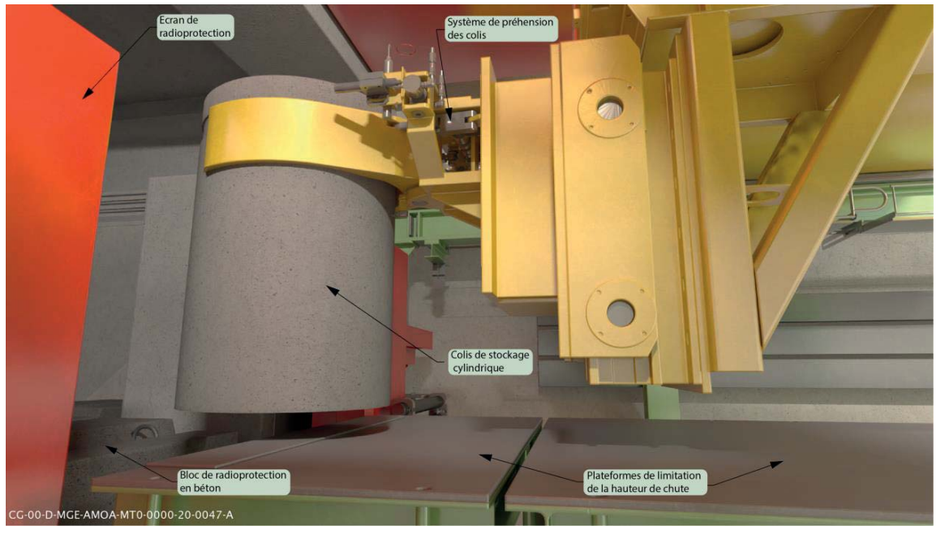


Figure 3-9 *Équipements de manutention de colis MA-VL-*

La maitrise des risques liés aux opérations de manutention

Compte tenu de toutes les dispositions de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences, la gestion du risque de collision lors du transfert à l'intérieur des installations nucléaires de Cigéo n'est pas susceptible de conduire à une perte de confinement des colis de déchets.

Seule la chute d'un colis de déchets radioactifs manutentionné à une hauteur au-delà de sa hauteur de qualification peut potentiellement conduire à une dissémination de substances radioactives. Une évaluation de conséquences d'une chute est présentée au chapitre 3.6.

3.3.2 Les risques liés à l'incendie

3.3.2.1 Description

L'occurrence d'un incendie nécessite la présence simultanée et en quantité suffisante, de matériaux combustibles, de comburant (oxygène) et d'une source d'ignition. Un incendie peut entrainer, sous certaines conditions, la dégradation voire la perte d'une fonction de sûreté.

Les principaux risques identifiés sont :

- les risques liés à un incendie d'un engin de manutention ou de transfert ayant pour origine un dysfonctionnement des motorisations ou des équipements électriques :
  - ✓ au cours des opérations de transfert et de déchargement des emballages de transport, il est susceptible de soumettre les emballages de transport et les colis à une élévation de température ;
  - ✓ pendant les actions de déchargement et de transfert des colis dans les installations, il est susceptible d'affecter les colis directement et/ou la hotte de transfert ;
  - ✓ durant le procédé de mise en colis de stockage, de mise en hotte et de déchargement des colis en alvéole, cet incendie pouvant conduire à une sollicitation directe des colis.
- les risques d'incendie associés aux locaux électriques qui accueillent de nombreux équipements.

3.3.2.2 Localisation

Depuis la réception des emballages de transport de colis de déchets radioactifs jusqu'à la mise en alvéole des colis de stockage, les charges contenant des substances radioactives sont manutentionnées et transférées avec des engins susceptibles de provoquer un incendie. Les risques d'incendie concernent donc toutes les zones traversées par ces engins de manutention et de transfert, c'est-à-dire toute l'installation nucléaire.

Des locaux techniques en support aux procédés et à l'exploitation sont aussi présents dans l'ensemble de l'installation nucléaire. Un incendie peut se développer dans ces locaux.

3.3.2.3 Dispositions de maitrise des risques

a) Prévention

La maîtrise du risque incendie repose en premier lieu sur l'identification des sources potentielles d'incendie présentes dans l'installation et des cibles à protéger des effets d'un incendie. Les principales cibles à protéger en cas d'incendie sont l'homme, l'environnement, les colis de déchets et toutes les fonctionnalités de l'installation contribuant à la protection des intérêts (ventilation, alimentation électrique, etc.).

Il s'agit ensuite de réduire au maximum la quantité de matériaux combustibles ou inflammables. Cette limitation passe par :

- le choix de matériaux de construction et d'aménagement avec des classes de performances élevées en matière de réaction au feu ;
- le choix de moyens de transfert électriques sur rails qui limitent intrinsèquement la charge calorifique dans l'installation ;
- le choix de conducteurs et câbles électriques d'alimentation de l'installation résistants ;
- pour la gestion des matières combustibles, le choix de dispositions de limitation de charge calorifique, de séparation et d'isolement de ces charges.

b) Surveillance

La surveillance permet de détecter au plus tôt un départ de feu et de limiter son développement et les conséquences associées**.** Des systèmes de détection automatique incendie, avec des technologies adaptées au type de feu qui pourrait se produire, sont installés dans tous les locaux et les zones sensibles (zones contenant des colis de déchets radioactifs, mais aussi contenant des systèmes supports au fonctionnement comme des armoires électriques ou de contrôle-commande, des ventilateurs…).

c) Limitation des conséquences

Les dispositions visant à éviter la propagation d'un incendie et à limiter ses conséquences reposent essentiellement sur la sectorisation des locaux, la ventilation et les dispositifs d'extinction incendie.

Les installations sont compartimentées par des parois résistantes au feu, des portes et des clapets coupe-feu asservis à la détection et équipées de systèmes d'extinction manuels ou automatiques en fonction du besoin.

En cas de détection incendie dans les installations, toutes les opérations de manutention des colis de déchets sont arrêtées automatiquement (possible également manuellement à distance en cas de défaillance du déclenchement automatique) et ces derniers sont posés au sol par mesure de sécurité.

Par ailleurs, la ventilation permet, selon les secteurs et les situations, l'extraction des fumées.

Des moyens d'intervention et de lutte contre l'incendie sont mis à disposition du personnel et des équipes de secours :

- moyens de secours portatifs (extincteurs…) ;
- des systèmes d'extinction fixes ou embarqués ;
- un groupe d'intervention de secours avec une organisation opérationnelle 24h/24h à la lutte contre l'incendie, formé et entraîné (des renforts, puis par l'engagement des moyens extérieurs des services de secours et d'incendie) ;
- des réseaux d'eaux incendie en surface et souterrain ;
- des véhicules d'intervention spécifiques à Cigéo, aptes au transport du personnel d'intervention avec leur équipement et matériel d'intervention ;
- des systèmes de récupération de l'eau d'extinction d'incendie.

Pour certains colis (cas de colis de déchets bitumés), les conteneurs de stockage ont fait l'objet d'essais pour tester leur résistance au feu.

Colis de stockage avant l'essai

Colis de stockage pendant l'essai

Colis de stockage après l'essai

Manutention du colis de stockage après l'essai

Intérieur du colis de stockage après l'essai

Figure 3-10 Illustration des essais de résistance au feu des colis

3.3.2.4 Situations accidentelles d'incendie

Les conséquences des situations accidentelles d'incendie sont présentées dans le chapitre 3.6 du présent document.

a) Incendie en cellule de déchargement

La cellule de déchargement est composée de plusieurs cellules dans lesquelles plusieurs colis primaires peuvent être présents.

Les armoires et coffrets électriques alimentant le pont et les équipements de ces cellules sont déportés dans un autre local. En outre, les moteurs électriques du pont sont équipés d'une sonde de température déclenchant leur arrêt en cas d'élévation anormale.

La cellule de déchargement est équipée d'un système de détection automatique d'ambiance et de caméras vidéo. Toutes les informations associées sont relayées en salle de commande centralisée et au poste de sécurité.

La cellule est également équipée d'un système d'extinction fixe à mousse et d'un système de rétention des eaux d'extinction. Ce système d'extinction peut être réalimenté en tant que de besoin depuis l'extérieur de la cellule par les équipes d'intervention.

Toutes les parois et les équipements les traversant sont résistants au feu pendant 2 heures.

Le système de ventilation nucléaire de la cellule est équipé de clapets coupe-feu qui se ferment automatiquement sur détection incendie, et sont également manœuvrables manuellement à distance si besoin.

Ainsi, un incendie se développant sur l'équipement de contrôle des colis à l'intérieur de la cellule de déchargement sera rapidement éteint et circonscrit. Une évaluation des conséquences radiologiques de cette situation est présentée au chapitre 3.6.

b) Incendie dans le couloir procédé de l'entreposage tampon

Dans l'entreposage tampon les colis primaires sont transférés après leur déchargement, leur contrôle et leur préparation pour le stockage. Ainsi préparés, ils constituent les colis de stockage qui sont manutentionnés dans l'entreposage tampon à l'aide d'un chariot et d'un transbordeur électriques sur rails.

Les coffrets électriques situés sur les équipements de transfert sont équipés d'extincteurs automatiques à déclenchement thermofusible autonome. Les motoréducteurs sont équipés de sondes de température déclenchant une alarme en salle de commande centralisée et au poste de sécurité en cas d'élévation anormale de celle-ci.

L'entreposage tampon et les couloirs de circulation des chariots et transbordeurs sont équipés d'un système de détection automatique d'ambiance.

Toutes les parois et les équipements les traversant sont résistants au feu pendant 2 heures.

Le système de ventilation nucléaire de la cellule est équipé de clapets coupe-feu qui se ferment automatiquement sur détection incendie, et sont également manœuvrables manuellement à distance si besoin.

De plus, les colis disposent d'une résistance au feu.

Ainsi, un incendie se développant sur l'équipement de transfert des colis à l'intérieur de l'entreposage tampon ne peut pas conduire à une dissémination de substances radioactives.

c) Incendie en cours de transfert dans une hotte

Les colis de stockage sont transférés de l'installation nucléaire de surface jusqu'aux alvéoles de stockage dans une hotte blindée et résistante à l'incendie. Elles sont transportées sur des chariots électriques sur

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

rails et le funiculaire dont la motorisation est déportée dans un local situé au-dessus de la descenderie et dont les parois sont résistantes au feu.

L'ensemble des galeries et descenderies est équipé d'un réseau maillé de détection et d'extinction incendie, et les équipes d'intervention sont gréées pour intervenir rapidement. Le génie civil est stable au feu sous incendie et un compartimentage est assuré régulièrement afin de circonscrire l'incendie et gérer les fumées.

Ainsi, un incendie sur un moyen de manutention lors du transfert dans une hotte ne peut pas conduire à l'endommagement des colis qu'elle contient.

d) Incendie dans un alvéole de stockage de colis de déchets MA-VL

Dans l'alvéole de stockage MA-VL, les colis de stockage sont manutentionnés à l'aide d'un pont stockeur alimenté par rail frotteur (évitant la présence de câble d'alimentation électrique). La charge calorifique présente sur le pont a été limitée au maximum (quelques coffrets électriques et motoréducteurs de motorisations de l'outillage de manutention, tel que la fourche). Le pont stockeur n'est pas présent dans la partie utile de l'alvéole (où sont stockés les colis de stockage de déchets radioactifs) lorsqu'aucun colis n'est en cours de manutention (ramené dans la cellule de manutention).

Les coffrets électriques situés sur le pont sont équipés d'extincteurs automatiques à déclenchement thermofusible autonome. Les motoréducteurs sont équipés de sondes de température déclenchant une alarme en salle de commande et au poste de sécurité en cas d'élévation anormale de celle-ci. Ces équipements sont également équipés de bacs de rétention, en cas de fuite d'huile.

En outre, le pont stockeur est équipé de moyens vidéo permettant de visualiser un éventuel dégagement de fumées.

Le système de ventilation nucléaire de l'alvéole est équipé d'un système de détection automatique à haute sensibilité sur la gaine d'extraction d'air de l'alvéole, en amont du système de filtration très haute efficacité (THE), et de clapets coupe-feu qui se ferment automatiquement sur détection. Ces derniers sont également manœuvrables manuellement à distance si besoin.

En outre, le pont stockeur est équipé d'un système de retrait de secours, appelé « lièvre », qui permet de le retirer de la partie utile de l'alvéole, pour le ramener dans la cellule de manutention.

Compte tenu de ses caractéristiques, un incendie sur le pont stockeur, même s'il n'est pas éteint rapidement n'est pas de nature à entraîner l'endommagement des colis de stockage, dont les performances de résistance au feu ont été testées.

Une évaluation des conséquences radiologiques de cette situation est présentée au chapitre 3.6 du présent document.

La maitrise des risques liés à l'incendie

Elle est assurée principalement par :

- la prévention notamment par le choix de matériaux adaptés et la réduction au maximum de la quantité de matériaux combustibles ou inflammables ;
- la surveillance avec l'implantation de systèmes de détection incendie sur les équipements de transfert et en ambiance des locaux ;
- la limitation des conséquences en évitant la propagation d'un incendie essentiellement grâce à la sectorisation mise en place, la ventilation et les dispositifs d'extinction incendie.

Compte tenu de ces dispositions de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences, le risque d'incendie à l'intérieur des installations nucléaires de Cigéo est faible et ses conséquences maitrisées.

Parmi l'ensemble des situations identifiées et analysées, deux situations accidentelles (en surface avec l'incendie de l'équipement de contrôle dans la cellule de déchargement et en souterrain avec l'incendie du pont stockeur dans l'alvéole MA-VL) peuvent potentiellement conduire à une dispersion de substances radioactives à l'extérieur de l'installation. Une évaluation des conséquences radiologiques de la situation accidentelle d'un incendie en alvéole MA-VL est présentée au chapitre 3.6.

3.3.3 Les risques liés à l'explosion

3.3.3.1 Description

Les risques liés à l'explosion font référence à la présence simultanée *a minima* :

- d'un combustible en suspension dans l'air (sous forme de gaz, vapeurs, brouillards, poussières ou fibres) dans son domaine d'explosivité ;
- d'un comburant (généralement l'oxygène de l'air) ;
- d'une source d'ignition. L'énergie minimale nécessaire pour enflammer un gaz ou une poussière peut être très faible et est appelée énergie minimale d'inflammation (EMI).

3.3.3.2 Localisation

Dans Cigéo, les risques d'explosion identifiés sont liés à la présence :

- de batteries susceptibles de dégager de l'hydrogène (H_2) en phase de charge (batteries des moyens de manutention et des véhicules électriques) ;
- de produits chimiques susceptibles de générer des vapeurs inflammables (ex : solvants organiques pour les besoins du laboratoire d'analyses) ;
- de bouteilles de gaz inflammables utilisées pour les besoins de l'exploitation du centre de stockage Cigéo (ex : bouteilles d'acétylène pour les soudures).

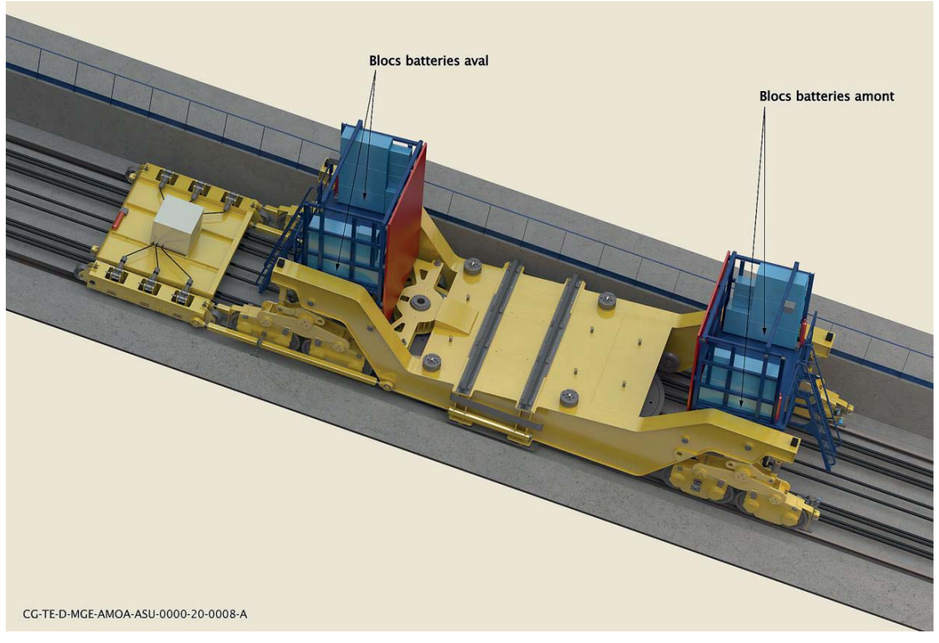


Figure 3-11 Batteries des moyens de manutention des colis de déchets

3.3.3.3 Dispositions de maîtrise des risques

a) Prévention

Les dispositions de prévention contre les risques liés à l'explosion consistent à exclure le domaine d'explosivité en contrôlant au moins une des trois conditions nécessaires à l'explosion. Cela repose en particulier sur :

- cas des batteries à l'origine d'un dégagement d'hydrogène :
  - ✓ le recours à des technologies de batteries étanches, à recombinaison de gaz, à recharge rapide et à faible dégagement d'H_2 ;
  - ✓ la ventilation des zones de charge des batteries en vue d'assurer une dilution adaptée de l'hydrogène ;
  - ✓ l'asservissement de la charge des batteries au fonctionnement effectif de la ventilation ;
  - ✓ la mise en place d'un zonage ATEX.
- cas des solvants :
  - ✓ la sélection de solvants présentant les propriétés les moins inflammables possibles ou, à défaut, la limitation au juste besoin des quantités en présence ;
  - ✓ l'entreposage dans des armoires sécurisées, sur rétention, dans des locaux dédiés et bidons fermés ;
  - ✓ la limitation des volumes stockés au regard des volumes des locaux ;
  - ✓ la mise en place d'une ventilation adaptée des zones d'entreposage ou, à défaut, d'armoires ventilées ;
  - ✓ l'établissement de procédures de sécurité lors du transport et de la manipulation des produits (ex : procédures de type permis de feu pour éviter les sources d'ignition).
- cas des bouteilles de gaz inflammable :

- ✓ en surface, les bouteilles de gaz sont stockées verticalement dans un local dédié situé à l'extérieur (ventilation naturelle), grillagé, couvert et maintenu fermé ;
- ✓ en souterrain, les bouteilles sont transportées par un chariot ou un cadre prévu pour le transport de bouteilles de gaz avec arrimage afin de prévenir leur chute ;
- ✓ les locaux dans lesquels sont utilisées les bouteilles de gaz sont ventilés. Leur utilisation n'est pas prévue en coactivité avec le procédé nucléaire et est suivie par un coordinateur chantier ;
- ✓ en cas d'arrêt prolongé ou accidentel de la ventilation, l'utilisation des bouteilles de gaz est proscrite ;
- ✓ les bouteilles sont équipées d'éléments de sécurité tels que des limiteurs de débit, joint auto-serreur, joint d'étanchéité, détecteur de fuite et autres dispositifs de sécurité.

b) Surveillance

La surveillance associée à la prévention des risques d'explosion dans Cigéo repose sur :

- la surveillance de la concentration en hydrogène dans les locaux concernés au moyen de capteurs ;
- la surveillance du fonctionnement de la ventilation au travers de remontées d'alarmes en salle de conduite centralisée et d'essais périodiques permettant de vérifier que les débits de ventilation produits sont supérieurs aux débits requis ;
- dans le cas des produits chimiques, la surveillance visuelle des systèmes de rétention par les opérateurs, formés au risque ATEX, au travers de rondes périodiques pour détecter d'éventuelles fuites.

c) Limitation des conséquences

La principale disposition de limitation des conséquences d'une explosion est l'éloignement des zones à risques d'explosion par rapport aux cibles identifiées à protéger, notamment les colis de déchets afin d'éviter un risque de dissémination, et les équipements assurant une fonction de sûreté de manière générale. Le cas échéant, ces cibles sont protégées par l'ajout d'une protection résistante à une explosion.

3.3.4 Les risques liés à une inondation interne

3.3.4.1 Description et localisation

La présence, sur le site, de réseaux d'eau engendre un risque d'inondation à l'intérieur des installations (consécutive à un débordement ou une fuite liée à une rupture de capacité).

Les principales sources de risques sont :

- les réseaux d'alimentation en eaux (eau sanitaire, eau incendie, eau de chauffage…) ;
- les réseaux de collecte des effluents liquides (eaux usées, effluents d'extinction d'un éventuel incendie) ;
- les capacités des fluides hydrauliques contenus dans les équipements.

L'inondation interne peut rester localisée (dans le cas d'un réseau fermé à la capacité limitée) ou être généralisée (dans le cas d'un réseau ouvert à la capacité illimitée ou suite à une agression de grande ampleur telle qu'un séisme).

Une rupture de ces réseaux pourrait conduire essentiellement l'immersion ou la projection d'effluents liquides sur une cible de sûreté (emballage, hotte, colis primaires ou colis de stockage) ou sur un équipement assurant ou participant au maintien d'une fonction de sûreté. Les conséquences pourraient être l'entraînement de substances radioactives par les effluents, le dysfonctionnement ou la perte de tout ou partie des équipements affectés à une fonction de sûreté.

3.3.4.2 Dispositions de maîtrise

a) Prévention et surveillance

La prévention du risque d'inondation interne repose sur des dispositions constructives et un programme de contrôle périodique :

- un dimensionnement des réseaux et des cuves tenant compte des caractéristiques des fluides et des conditions d'utilisation (température, pH, pression, etc.), complété par un programme de contrôle et d'essai périodique. Les propriétés des matériaux (acier galvanisé et acier inoxydable) garantissent leur résistance à la corrosion. La conception robuste des réseaux suivant les normes et réglementations en vigueur et le suivi d'un programme de maintenance périodique des équipements assurent leur résistance aux défaillances intrinsèques et leur tenue aux agressions identifiées ;
- les cheminements et protections des réseaux permettant de limiter les risques d'agression mécanique. L'implantation des réseaux est privilégiée dans des zones protégées et éloignées de celles accueillant les colis de déchets radioactifs ou les substances dangereuses. Ces réseaux sont surveillés régulièrement et les locaux concernés sont équipés de capteurs de présence d'eau.

b) Limitation des conséquences

Les principales dispositions sont les suivantes :

- l'implantation de vannes de sectionnement des réseaux pilotables sur détection de variation brutale de pression ou de débit ;
- le placement des cuves dans des rétentions adaptées à leur volume ;
- des caniveaux servant à récupérer d'éventuels effluents avec puisards dimensionnés au volume maximal d'effluents pouvant fuités.

3.3.5 Les risques liés aux substances dangereuses non radioactives

À ce stade des études, la démarche d'analyse des risques d'émission de substances dangereuses n'a pas identifié de risque pouvant mettre en jeu la sûreté des installations. En effet, les sources identifiées au sein des installations nucléaires ne sont pas susceptibles de générer des émissions pouvant avoir un impact sur les cibles de sûreté, ainsi que l'Homme ou l'environnement.

Le principe retenu à ce stade est qu'aucun produit chimique toxique, nocif ou corrosif ne sera présent dans l'environnement immédiat des colis de déchets (les opérations où sont mises en jeu ces produits étant réalisées en l'absence de tout colis de déchets).

3.3.6 Les risques liés à l'émission de projectiles

3.3.6.1 Description et localisation

Les risques liés à l'émission de projectiles concernent les pièces mises en mouvement susceptibles d'agresser, en cas de défaillance, une cible de sûreté ou un équipement participant à l'accomplissement d'une fonction de sûreté. Cela concerne les pales des ventilateurs de soufflage et d'extraction.

3.3.6.2 Dispositions de maîtrise des risques

a) Prévention

La prévention des risques liés à l'émission de projectiles repose en premier lieu sur l'éloignement des cibles de sûreté.

Des dispositions complémentaires relatives à la conception des ventilateurs selon les normes en vigueur ou encore leur maintenance périodique comme par exemple :

- la sélection, à la conception, de ventilateurs répondant aux normes en vigueur ;
- la présence de dispositifs permettant de limiter la vitesse de rotation des éléments tournants ;
- la réalisation d'opérations de maintenance préventive pour vérifier l'état des ventilateurs.

b) Surveillance

La défaillance des ventilateurs est remontée en salle de conduite centralisée via des dispositifs de surveillance de type capteurs (ex : capteurs sur l'état de marche ou sur la vitesse de rotation des ventilateurs). En cas de détection de survitesse (mise en garde de vitesse haute), le ventilateur est mis à l'arrêt et des actions de maintenance correctives sont mises en place.

3.3.6.3 Limitation des conséquences

La défaillance d'un ventilateur conduisant à l'émission de projectiles et à l'endommagement d'un autre équipement du système de ventilation nucléaire est sans conséquence sur le système de ventilation nucléaire et sur la fonction de sûreté associée, compte-tenu :

- de la ségrégation physique des réseaux de ventilation nucléaire (ségrégation par bâtiment, au sein d'un même bâtiment voire au sein d'un même local de telle sorte qu'un ventilateur défaillant ne puisse porter atteinte à une autre cible que le ventilateur en lui-même) ;
- de la redondance des équipements sensibles du système de ventilation. Par exemple, dans le cas des alvéoles MA-VL, les ventilateurs sont redondés quatre fois (3 normaux + 1 secours) et en cas de perte totale du soufflage, la ventilation peut être maintenue par le biais des ventilateurs d'extraction.

3.3.7 Les risques liés aux équipements sous pression

3.3.7.1 Description et localisation

Les équipements sous pression font référence aux capacités et tuyauteries associées permettant de distribuer des fluides sous pression dans l'installation (ex : air comprimé).

L'évènement redouté correspond à leur rupture susceptible d'entraîner la perte de l'utilité associée ou l'endommagement de cibles de sûreté situées dans l'environnement proche des capacités. Ce risque concerne :

- les capacités tampons de la centrale de production et de distribution d'air comprimé du bâtiment nucléaire de surface EP1 ;
- le réseau d'air comprimé nécessaire pour les besoins du procédé ou de la maintenance (par exemple, pour actionner les moteurs pneumatiques, pour tester l'efficacité des filtres, pour gonfler les joints gonflables des façades d'accostage des hottes et des portes assurant la fonction de confinement, pour le poste de soudage des colis de stockage HA, etc.) ;
- le réservoir d'air comprimé de l'unité de production d'air comprimé situé dans la zone d'accostage des cellules de manutention des alvéoles MA-VL.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

3.3.7.2 Dispositions de maîtrise des risques

a) Prévention

Les dispositions de prévention visent en premier lieu à éviter la rupture des capacités sous pression. Elles reposent sur le respect de la réglementation relative aux ESP :

- la conception selon les normes de fabrication en vigueur et selon des technologies éprouvées ;
- l'utilisation selon les normes en vigueur et associée à une maintenance périodique ;
- l'inspection périodique réalisée par un organisme agréé et la requalification de l'équipement tous les 10 ans ;
- la protection contre les surpressions par des accessoires de sécurité de type soupapes de sécurité, intégrés à la conception, pour limiter la montée en pression en-deçà de la pression maximale admissible (PS).

b) Surveillance

La surveillance des capacités sous pression repose sur la surveillance de la pression par des mises en garde de pression basse ou haute via des capteurs (manomètres) installés sur les équipements et transmettant l'information d'une défaillance au contrôle commande.

En cas de détection de pression haute ou basse dans le réseau concerné, l'équipement est mis à l'arrêt pour procéder aux opérations de maintenance corrective.

c) Limitation des conséquences

Les dispositions de limitation des conséquences en cas de perte des utilités associées aux équipements sous pression fait l'objet du chapitre 3.3.12.

En outre, en ce qui concerne les équipements sous pression associés aux réseaux de production et de distribution d'air comprimé, leur rupture est sans conséquence sur les cibles de sûreté situées dans l'environnement proche compte tenu de leur localisation dans des locaux dédiés.

3.3.8 Les risques liés à la perte de l'alimentation électrique

3.3.8.1 Description et localisation

La perte de l'alimentation électrique peut conduire à l'indisponibilité des équipements alimentés par le réseau électrique. La perte de l'alimentation électrique est ainsi susceptible de générer des risques dans l'installation (risques de manutention, incendie…), ainsi que la perte de fonctions de sûreté et donc à une remise en cause de la sûreté de l'installation.

3.3.8.2 Dispositions de maitrise des risques

La conception du système de distribution électrique repose sur une architecture permettant différents niveaux de fiabilité selon la fonction à assurer.

Pour l'alimentation électrique des récepteurs, celle-ci repose sur une architecture de distribution permettant différents niveaux de fiabilité d'alimentation adaptés aux fonctions assurées par les différents récepteurs.

À ce titre, l'architecture du réseau électrique se compose :

- d'une alimentation normale composée de deux voies d'alimentation indépendantes et redondées *a minima* jusqu'au niveau des postes de transformation 90 kV/20 kV. Cette redondance d'alimentation par deux voies différentes concerne uniquement les récepteurs jugés sensibles au point de vue sûreté et sécurité ;

- d'une alimentation secourue assurée par un ensemble de groupes électrogènes ;
- de dispositifs d'alimentation sans interruption (ASI) permettant de maintenir en permanence l'alimentation des récepteurs les plus sensibles.

Les différents composants du système de distribution électrique sont surveillés en permanence et des reports d'alarmes sont effectués en salle de conduite centralisée, permettant de prendre les mesures appropriées le plus efficacement possible.

En cas de perte d'un équipement électrique entrainant l'indisponibilité d'une voie d'alimentation, l'alimentation des récepteurs le nécessitant est basculée sur la seconde voie et permet leur fonctionnement.

En cas de perte de l'alimentation normale, la mise en place d'une architecture électrique associant des groupes électrogènes de secours et les dispositifs d'alimentation sans interruption permet de maintenir l'alimentation électrique des différents récepteurs de l'installation le nécessitant. Cette alimentation de secours permet de mettre à un état dit « sûr »[27] l'installation et de maintenir les équipements de sécurité et de sûreté opérationnels.

Ainsi, en cas de défaillance sur les systèmes d'alimentation électrique, de nombreux équipements redondants permettent de prendre le relai des fonctions à assurer et d'arrêter le procédé afin de réparer. Même en cas de pertes multiples, les délais avant l'atteinte d'une situation à risque sont suffisamment longs pour entreprendre des réparations ou un remplacement d'équipement.

3.3.9 Les risques liés à une perte de la ventilation

3.3.9.1 Description

La ventilation participe à l'accomplissement (de manière directe ou indirecte) de fonctions de sûreté de l'installation, notamment :

- le confinement dynamique de certains locaux en assurant une hiérarchie des pressions ;
- le conditionnement de l'atmosphère de manière à réguler la température par l'apport d'air frais et assurer le maintien des conditions ambiantes compatibles avec le bon fonctionnement des équipements requis au titre de la sûreté ;
- l'évacuation les gaz de radiolyse dans les alvéoles MA-VL.

La ventilation assure également une fonction de confort pour le personnel.

Le réseau de ventilation est composé de ventilateurs de soufflage et d'extraction, de gaines, de filtres dont le dernier niveau de filtration (DNF) et de clapets anti retours.

Deux principaux réseaux de ventilation indépendants sont présents. Il s'agit du réseau de ventilation du bâtiment nucléaire de surface et du réseau de ventilation des ouvrages souterrains.

3.3.9.2 Dispositions de maîtrise des risques

La conception des réseaux de ventilation respecte les normes de conception des différents équipements et font l'objet de maintenances préventives.

L'architecture des réseaux de ventilation est conçue en tenant compte des conséquences liées à leur perte vis-à-vis des fonctions de sureté à accomplir. Ainsi, des dispositions de maîtrise de ces risques sont retenues. Il s'agit principalement de la redondance de certains équipements tels que les ventilateurs

[27] L'état sûr est un état stabilisé de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo dans lequel les opérations de manutention sont arrêtées et le confinement des substances radioactives est assuré durablement. Le caractère « durable » s'apprécie notamment au regard de l'autonomie de l'installation et des possibilités d'appui externe, ainsi que de la possibilité de réaliser des interventions, si nécessaire.

d'extraction, les filtres très haute efficacité, la redondance de l'alimentation électrique ainsi que la protection au feu de certains équipements.

Des dispositions sont également retenues pour assurer le bon fonctionnement de la ventilation en cas d'agressions externes telles que le séisme ou les conditions climatiques extrêmes. Les équipements de ventilation sont par exemple dimensionnés pour rester fonctionnels après un séisme ou après une tornade.

Par ailleurs, la ventilation fait l'objet d'une surveillance particulière afin de s'assurer de son bon fonctionnement. Les moyens de surveillance directs sur les équipements sont mis en place (détection d'arrêt d'un ventilateur ou surveillance du positionnement des clapets anti retour). Une surveillance des débits de ventilation et des cascades de dépression, par exemple, permettent de s'assurer que les fonctions de sûreté sont assurées.

Malgré toutes ces dispositions en place pour l'éviter, une perte de ventilation ne conduirait pas à des conséquences sur la sûreté compte tenu des délais disponibles pour rétablir la ventilation via des actions correctives.

3.3.10 Les risques liés à la perte de la surveillance radiologique

3.3.10.1 Description et localisation

La surveillance radiologique est assurée par différents équipements installés sur l'ensemble de l'installation permettant de contrôler les niveaux d'irradiation et de contamination atmosphérique dans les locaux mais également de surveiller les rejets dans l'environnement au travers de prélèvements, notamment au niveau des émissaires.

La surveillance radiologique jouant un rôle prépondérant dans la défense en profondeur de l'installation, sa perte pourrait constituer un risque de dépassement des seuils de rayonnement (irradiation ou contamination) ou de perte du suivi des rejets atmosphériques.

3.3.10.2 Dispositions de maitrise des risques

Concernant les dispositions de maitrise du risque, les principaux équipements de mesure (ex : rejets gazeux) et les réseaux permettant la remontée de l'information sont redondés.

En cas de perte de la surveillance, une remontée d'alarme se fait via le contrôle commande à la salle de conduite centralisée.

De plus, sans concomitance avec une autre défaillance ou agression, la perte de la surveillance radiologique n'engendre pas de rejets ou d'exposition des personnes supérieures au fonctionnement nominal.

3.3.11 Les risques liés à la perte du contrôle-commande

3.3.11.1 Description et localisation

Le risque de perte du contrôle commande concerne la perte ou la défaillance du système d'information industriel de Cigéo, permettant d'assurer notamment les fonctions de contrôle commande :

- du procédé nucléaire qui intègre les équipements de manutention des colis primaires et de stockage ;
- des différents systèmes intégrant notamment la radioprotection, la ventilation nucléaire, les systèmes de sécurité incendie et la gestion des matières nucléaires.

Les risques liés à la perte du contrôle commande sont la perte de la remontée d'information ou la perte du contrôle de certaines fonctions qui pourraient générer des risques pour la sûreté :

- soit par perte de la fonction assurée par l'équipement (par exemple la perte de la ventilation en cas de perte d'un équipement du contrôle commande de la ventilation) ;
- soit par la réaction inadaptée d'un composant (par exemple l'ouverture intempestive ou inadéquate d'une porte blindée).

3.3.11.2 Dispositions de maitrise des risques

Les dispositions de maitrise du risque de perte du contrôle commande reposent sur l'intégration de programmes d'essais et la qualification des fonctions liées au contrôle-commande lors de sa conception mais également lors de la mise en service de l'installation.

L'architecture du contrôle commande se base sur l'utilisation d'un système de haute disponibilité et à forte résilience ainsi que par la redondance de certains composants du système, notamment les postes de commande et les serveurs.

De plus, pour le contrôle commande du procédé nucléaire, un second système est mis en place et dédié exclusivement à la surveillance du procédé et au déclenchement d'actions de sécurité. Par conception, en cas de défaillance de ce second système, les équipements du procédé s'arrêtent et se mettent automatiquement en sécurité.

3.3.12 Les risques liés à la perte des fluides

Les principaux fluides au sens de la sûreté en exploitation sont l'air comprimé et l'eau incendie.

L'air comprimé est nécessaire pour réaliser le gonflage de joints nécessaires pour assurer l'étanchéité d'une porte ou d'un accostage par exemple. Dans une moindre mesure, l'air comprimé est également utilisé afin d'actionner des motorisations pneumatiques d'équipements. L'air comprimé est produit par un compresseur et est distribué dans des réseaux de distribution jusqu'aux équipements utilisateurs.

La perte d'air comprimé peut conduire à un blocage de porte ou de mise en stockage des colis.

Ces conditions ne conduisent pas à des risques spécifiques. Le confinement des substances radioactives reste assuré par les colis. Des interventions sont réalisées afin de revenir en situation normale de fonctionnement et de poursuivre l'exploitation. Afin de détecter toute défaillance, des capteurs de pression sont installés sur le réseau d'air comprimé. Des contrôles périodiques sont effectués afin de prévenir tout risque de défaillance.

L'utilité « réserve en eau incendie » est nécessaire pour la lutte contre l'incendie susceptible de se produire sur l'installation. Les réserves d'eau incendie sont constituées de plusieurs réservoirs d'eau (principal, de secours…). Ils peuvent être alimentés par deux sources (eau concessionnaires et eau recyclée).

Les moyens de lutte comprennent entres autres deux réseaux incendie qui sont interconnectés. Ils desservent les installations de surface de la zone descenderie et de la zone puits, les liaisons surface fond et l'installation souterraine. La fourniture de la pression et du débit dans l'installation souterraine est assurée par gravité.

En cas de perte de l'alimentation en eau d'une réserve ou d'un réseau, les autres moyens d'alimentation, réserves et réseau permettent de maintenir la fonction.

3.3.13 Les risques liés au vieillissement des équipements et ouvrages

Une démarche proactive est mise en œuvre dès la conception afin de s'assurer que des mesures techniques et organisationnelles soient en place pour gérer les mécanismes de vieillissement des

équipements et ouvrages, en tenant compte du retour d'expérience, de normes et de réglementations, ainsi que des recommandations des instances internationales.

Ainsi, les ouvrages sont dimensionnés et les équipements sont choisis et/ou conçus en prenant en compte leur durée d'utilisation et de fonctionnement, leur accessibilité et les possibilités pour assurer leur surveillance et les conditions d'ambiance dans lesquelles ils sont placés. Ces dernières sont définies et assurées afin de limiter leur vieillissement.

Un programme de maintenance préventive (contrôles et essais périodiques adaptés) est mis en place afin de vérifier les caractéristiques fonctionnelles attendues des ouvrages et équipements et de vérifier qu'il n'y a pas de dégradation dans le temps de leurs caractéristiques.

Un programme de jouvence (remplacement) est défini à des fréquences adaptées aux équipements et ouvrages afin d'anticiper leur vieillissement et/ou leur obsolescence.

» JOUVENCE

La jouvence est une phase de travaux permettant de remplacer un système ou un bâtiment dans son ensemble, parce que sa maintenance en est devenue extrêmement difficile.

Des examens décennaux sont également effectués afin de détecter tout vieillissement précoce ou risque d'obsolescence, et ainsi de programmer des actions complémentaires de rénovation ou de remplacement.

Une maintenance corrective (réparations) est effectuée en cas de détection de défauts ou de défaillance sur les ouvrages et les équipements.

Enfin, les ouvrages et les équipements non accessibles dans les alvéoles de stockage sont conçus avec des marges de dimensionnement (choix des matériaux, surépaisseurs…) permettant d'atteindre un haut degré de confiance quant à leur fiabilité sur la période de fonctionnement envisagée. Des contrôles stricts à réception de leur bon dimensionnement sont prévus. Des dispositions de surveillance directes (capteurs de suivi des déformations du génie civil, en radier et en voute) et indirectes (usure sur le pont roulant observable en cellule de manutention) sont mises en place pour détecter tout vieillissement précoce des matériaux et équipements nécessaires au bon fonctionnement des alvéoles de stockage pendant la phase de fonctionnement. En cas de dérive, des investigations complémentaires peuvent être menées en alvéole à l'aide du pont roulant instrumenté depuis la cellule de manutention (caméra, scanner pour télémétrie, etc.) à des fins d'inspection. En ultime secours, un retrait des colis de l'alvéole est possible pour les déplacer dans un autre alvéole à proximité.

Compte tenu des nombreuses dispositions prises, le vieillissement d'équipements ou d'ouvrage ne peut conduire à lui seul à un accident.

3.3.14 Les risques liés à la coactivité

a) Coactivité exploitation/construction d'ouvrages

Dans le centre de stockage Cigéo, la réalisation simultanée d'activités d'exploitation nucléaire et de construction d'ouvrages, notamment de creusement de nouveaux alvéoles dans l'installation souterraine, présente des risques dits de coactivité.

Tenant compte du retour d'expérience, au niveau national et international, la conception et l'exploitation des installations sont basés sur des principes forts :

- une barrière robuste entre la zone en exploitation nucléaire et la zone en travaux dans l'installation souterraine. Cette barrière est composée de séparations physiques résistantes aux agressions (choc ou collision d'un engin, incendie de 2 heures sur un engin…), étanches aux fumées ;

- une indépendance totale entre les deux zones (zone en exploitation nucléaire et zone en travaux). C'est-à-dire que chaque zone possède des réseaux d'utilités (alimentation électrique, ventilation…), des moyens de surveillance, des moyens de secours et d'évacuation qui lui sont propres. Les travaux de creusement, de construction et d'équipement des nouveaux alvéoles sont par conséquent réalisés au sein d'un chantier dit « clos et indépendant » de l'installation nucléaire.

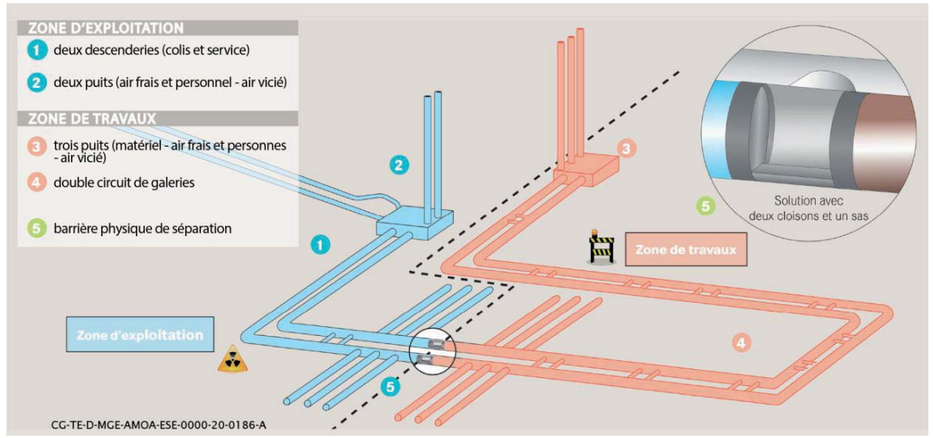


Figure 3-12 Illustration des principes fort de gestion de la co activité

b) Coactivités en exploitation/maintenance/jouvence

Les opérations de contrôles réglementaires, d'essais périodiques et de maintenance préventive sont planifiées à l'avance.

Concernant les opérations de jouvence ou de maintenance lourde, celles-ci prévues à certaines décennies, consistent à réaliser les opérations de réfection et de rénovation en interrompant le procédé principal de manutention et de transfert des colis de déchets radioactifs.

Ainsi, un événement survenant dans l'une des deux zones, ou sur des opérations de jouvences ou de maintenance lourde, ne pourra entraîner d'effet domino sur des installations sensibles, notamment celles contenant des colis de déchets radioactifs.

La maitrise des risques liés à la coactivité

La maitrise des risques liés à la co-activité est assurée par le fait que :

- les **zones nucléaires en exploitation sont séparées physiquement des zones en travaux** ;
- les séparations des deux zones sont conçues afin d'être résistantes aux agressions (choc ou collision d'un engin, incendie de 2 heures sur un engin…) et étanches aux fumées ;
- tous les flux travaux et exploitation (réseaux électriques, aérage, personnel, matériel, etc.) sont également séparés.

3.3.15 Les risques liés aux opérations de retrait en exploitation

LES OPÉRATIONS DE RETRAIT EN EXPLOITATION[28]

Des opérations ponctuelles de retrait de colis des alvéoles pourront être utiles à l'exploitant en fonctionnement normal (utilisation d'un colis pour un essai, une mesure, un réagencement…) ou dégradé (défaut de positionnement d'un colis…), incidentel ou accidentel de dimensionnement (choc pendant sa manutention en alvéole…).

Le retrait des colis se fait selon un procédé identique à la mise en place, mais inversé. Des équipements spécifiques complémentaires peuvent néanmoins être nécessaires dans certaines situations (retrait des colis HA avec un robot « tireur » à la place du robot « pousseur », fourche orientable pour les colis MA-VL mal positionnés…).

Ces opérations de retrait sont menées de façon ponctuelle et ne concernent qu'un nombre réduit de colis. Elles sont intégrées dans la conduite de l'exploitation et ne perturbent pas significativement les flux de mise en stockage. Elles interviennent pendant la période de remplissage d'un alvéole. Les colis de déchets retirés des alvéoles dans le cadre des opérations de retrait d'exploitation sont ensuite réintroduits en alvéole pour stockage.

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour que, sur toute la période allant de sa mise en service jusqu'à la décision de sa fermeture définitive, les colis puissent en être retirés aisément.

Les composants jouant un rôle important pour le retrait (notamment les colis, les équipements de manutention et les alvéoles) sont conçus de façon robuste et durable. Par exemple, les alvéoles dans lesquels sont stockés les colis de déchets sont revêtus d'une structure, en béton ou en acier, pour limiter leurs déformations. Sur la durée du fonctionnement du centre de stockage, les jeux fonctionnels et les conditions de fonctionnement des équipements utilisés pour le retrait des colis de déchets sont préservés.

La position précise de chaque colis stocké et son contenu sont enregistrés afin de disposer de toutes les informations permettant de préparer un éventuel retrait.

Les moyens de manutention utilisés pour stocker les colis de déchets MA-VL dans les alvéoles permettent également de les en retirer. Pour les colis HA, des robots spécifiques permettant de les retirer des alvéoles sont développés. Des essais de retrait de colis sont réalisés avant et après la mise en service de l'installation nucléaire pour vérifier la performance des équipements de retrait. À ce jour, des tests à l'échelle 1 avec des colis fictifs ont d'ores et déjà été réalisés avec des prototypes.

Les alvéoles de stockage sont surveillés pour suivre l'évolution des conditions de retrait (caractéristiques de l'ambiance de l'alvéole, jeux fonctionnels, conditions de fonctionnement des équipements de retrait…).

Compte tenu du dimensionnement des alvéoles et de leur tenue ainsi que la maintenance des équipements de préhension et de transfert, les colis restent accessibles pendant toute la durée de la phase de fonctionnement

De par leur conception, et les conditions dans les alvéoles favorables à leur tenue dans le temps, les colis de stockage récupérés ne présentent pas de contamination supérieure aux limites fixées pour leur mise en stockage.

Par précaution, un contrôle de la contamination est réalisé avant le retrait et si nécessaire, un système de fixation de la contamination est mis en place avant le transfert.

[28] Les opérations hypothétiques de retrait font l'objet d'un document dédié présentant les options techniques de récupérabilité dit « DORec». La DORec est une pièce du dossier Cigéo 2015 complémentaire aux DOS-Exploitation et DOS-Après fermeture, les DOS faisant l'objet de la présente synthèse (18).

Ainsi, les colis peuvent être retirés pendant toute la durée du fonctionnement puis transférés jusqu'à la surface dans des conditions similaires à leur mise en stockage.

En fonction de la date de l'éventuelle opération de retrait, les moyens de manutention utilisés pourront être renouvelés (équipements éventuellement obsolètes) ou adaptés aux conditions opérationnelles. Les conditions de retrait feront l'objet de réévaluations périodiques (réexamens de sûreté, revues de réversibilité, mise à jour du plan directeur pour l'exploitation).

3.4 Les risques d'agressions externes

Les activités humaines externes et les aléas naturels peuvent présenter des risques d'agression des installations de l'installation nucléaire. L'ensemble des risques liés à ces activités et aléas sont analysés et font l'objet de disposition de prévention, de détection et de limitation des conséquences.

3.4.1 Les risques liés à l'environnement industriel et voies de communication

Les installations industrielles et voies de communication qui peuvent présenter des risques pour l'INB sont les installations à proximité des sites, les réseaux fluides ou électriques et les voies de communication terrestre, ferroviaires ou navigable.

Au regard des activités aux alentours du site, de la faible industrialisation de la région et du choix d'implantation du site, aucune installation industrielle pouvant présenter des risques pour le centre de stockage Cigéo n'est située à moins de deux kilomètres. Cette distance permet d'écarter tout impact significatif sur les installations de l'installation nucléaire.

Concernant les routes à proximité, des camions citernes contenant des produits inflammables (GPL et essence d'une capacité pouvant aller jusqu'à 20 m^3) pourront circuler sur la route départementale D960 et sur la route départementale D175, se situant à proximité de la zone descenderie.

Deux situations accidentelles sont retenues :

- une vaporisation violente à caractère explosif, aussi appelé BLEVE d'un camion-citerne contenant 20 m^3 de GPL ;
- une inflammation d'un nuage de gaz inflammable formé à la suite d'une fuite sur une camion-citerne contenant du GPL (20 m^3).

La quantification des effets de ces situations a été réalisée en se référant à la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 (19) et l'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation (20).

Les conséquences de ces accidents sont :

- des effets thermiques présentant un danger pour l'homme et l'environnement dans un rayon de 250 m ;
- des effets de surpression pouvant conduire à des dégâts sur les structures et des effets significatifs sur l'Homme dans un rayon de 300 m.

Les distances d'effet évaluées sont bien inférieures aux distances de l'ordre de 500 m entre les axes routiers considérés et les installations sensibles en particulier le bâtiment nucléaire de surface assurant la réception et la préparation des colis de stockage des déchets radioactifs.

Les effets de ces accidents ne sont pas à même de remettre en cause la sûreté des installations.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

3.4.2 Les risques liés à la chute d'avion

Les risques liés à la chute d'avion sont à prendre en compte si les probabilités de chute sur un bâtiment de surface du centre de stockage Cigéo sont supérieures à 10^{-7} par an.

Les bâtiments faisant l'objet d'évaluations de probabilité de chute sont principalement les bâtiments abritant des substances radioactives et les bâtiments abritant des locaux et équipements assurant une ou des fonctions de sûreté tels que confiner les substances radioactives ou maîtriser l'évacuation des gaz de radiolyse. Ainsi, le bâtiment nucléaire de surface EP1, le puits d'extraction d'air vicié de l'installation souterraine ainsi que les bâtiments assurant la maîtrise du risque d'incendie en zone descenderie et en zone puits avec leurs réservoirs d'eau incendie associés font l'objet d'une évaluation de probabilité de chute.

Compte tenu des évaluations effectuées, des dispositions particulières sont mises en place vis-à-vis des risques de chute d'avion pour le bâtiment nucléaire de surface EP1, le puits de d'extraction d'air vicié de l'installation souterraine ainsi que pour le bâtiment assurant la maîtrise du risque d'incendie.

Ces dispositions consistent à maîtriser l'impact de l'avion essentiellement via un dimensionnement du génie civil des bâtiments.

Des dispositions complémentaires sont également retenues. Il s'agit de dispositions d'exploitation telles que l'interdiction d'entreposage de colis de déchets en périphérie du bâtiment nucléaire de surface EP1 et de conception telles que l'espacement significatif des réservoirs d'eau incendie afin de maintenir en toute situation une capacité d'intervention en cas d'incendie.

3.4.3 Les risques liés aux aléas naturels

Les conditions climatiques extrêmes auxquelles peuvent être soumises les installations et qui pourraient nuire à leur bon fonctionnement sont le séisme, les fortes pluies et remontées de nappe phréatique, les vents forts ou les tornades, la neige abondante, les températures très chaudes ou très froides, ainsi que la foudre.

Les installations nucléaires du centre de stockage Cigéo, ainsi que leurs installations support (usines de ventilation par exemple) sont conçues et dimensionnées selon les recommandations de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), autant ou plus contraignantes. Les principales dispositions de protection de ces installations-à-vis des aléas naturels sont restituées ci-après.

3.4.3.1 Risques liés à un aléa sismique

Outre la détérioration des bâtiments et ouvrages, le séisme peut être la cause de la dégradation ou de la perte d'équipements importants pour la sûreté, soit par destruction directe de ces équipements soit par des agressions induites (création de projectiles, perte d'alimentation électrique, chute de charge, perte du refroidissement, incendie…). Ainsi, l'occurrence d'un séisme peut conduire à des incidences négatives notables sur l'environnement.

Les installations nucléaires sont construites, conçues et exploitées, conformément aux règles spécifiques applicables aux installations nucléaires, pour qu'en cas de séisme, dit « majoré de sécurité » (SMS), les installations soient maintenues dans un état dit « sûr » et que ce phénomène n'entraine pas de conséquence sur l'homme et l'environnement.

Pour ce faire, les composants (structure et équipements) de l'installation importants pour la sûreté ou pouvant être agresseurs de ces composants sont dimensionnés à un séisme de référence (dénommé séisme de dimensionnement (SDD), supérieur au séisme majoré de sécurité). Ce dimensionnement s'effectue selon deux critères :

- le besoin de stabilité et d'intégrité d'un composant, qui consistent à assurer le bon dimensionnement du supportage et de ses ancrages et le non dépassement des contraintes admissibles au niveau de sa structure ;

- la tenue fonctionnelle d'un composant, qui consiste à assurer son fonctionnement correct ou sa disponibilité lorsqu'il est soumis aux vibrations engendrées par le séisme.

Ce dimensionnement permet de préserver les fonctions de sûreté de l'installation en cas de séisme.

3.4.3.2 Risques liés aux aléas climatiques

a) Les risques d'inondation externes

Les risques d'inondation externe pour les installations nucléaires de surface sont liés à la présence d'eau (pluies, crues, tempêtes, rupture de tuyauteries extérieures…) autour de l'INB. Vis-à-vis de l'installation souterraine, le principal risque est lié à l'infiltration d'eau provenant des aquifères traversés par les liaisons surface fond, descenderies (y compris la tête de descenderie) et les puits.

Les conséquences d'une inondation externe sont principalement une entrée d'eau dans les installations sensibles pouvant conduire à des risques de dispersion de substances radioactives, des risques de perte d'alimentation électrique ou encore des risques d'incendie (création de court-circuit).

Installations de surface

Les risques associés aux pluies sont maîtrisés par la mise en place de réseaux de collecte. Ces réseaux de collecte des eaux pluviales (zone descenderie, zone puits, installation terminale embranchée, liaison intersites, poste électrique RTE…) sont équipés de plusieurs bassins de rétention.

Les réseaux de collecte des eaux pluviales et les bassins associés permettent de faire face à une pluviométrie exceptionnelle, c'est-à-dire qu'ils peuvent collecter et contenir un volume d'eau statistiquement atteint bien moins d'une fois tous les 100 ans. Il est aussi vérifié que, même dans le cas d'une obstruction du réseau de collecte, le ruissellement en surface des eaux pluviales n'engendre pas de conséquences sur la sûreté de l'installation.

Les risques associés aux remontées de nappe phréatique sont essentiellement vis-à-vis du bâtiment nucléaire de surface « EP1 » qui est semi-enterré. Les risques sont maîtrisés par la mise en place de dispositions telles qu'un système d'étanchéité et de drainage sous radier et contre les parois extérieures enterrées.

Les risques associés à une rupture d'un réseau d'eaux, d'un bassin d'eau ou de réserves d'eau incendie sont maîtrisés par l'implantation (et l'altimétrie) de ces éléments vis-à-vis notamment des bâtiments contenant des substances radioactives ou réalisant des fonctions de sûreté. Ainsi une rupture ne conduit pas à l'entrée d'eau dans ces bâtiments.

Installation souterraine

La maîtrise des risques liés aux infiltrations dans les liaisons surface-fond (descenderies et puits) est assuré par un revêtement étanche au niveau des Calcaires du Barrois. Le puits de ventilation d'extraction d'air de la zone en exploitation est quant à lui équipé de ce revêtement sur toute sa hauteur pour limiter le besoin d'y accéder. Les liaisons surface-fond sont également équipées d'un bulbe d'étanchéité (cf. Figure 3-13) et d'injections de collage qui sont mis en place à l'interface entre les différentes couches géologiques traversées. Par ailleurs, des caniveaux et des gouttières permettent de récupérer et d'acheminer de manière gravitaire les éventuelles eaux collectées dans les liaisons surface-fond vers des rétentions dédiées à chaque zone, situées à l'écart des zones de stockage des colis de déchets radioactifs en zone d'exploitation nucléaire. Dans chaque zone, ces rétentions sont connectées entre elles en partie haute, afin d'assurer la fonction de trop plein. Les eaux sont remontées en surface pour analyse et traitement adapté. Tous les dispositifs sont conçus avec des marges de dimensionnement et font l'objet de surveillance et de maintenance régulière.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

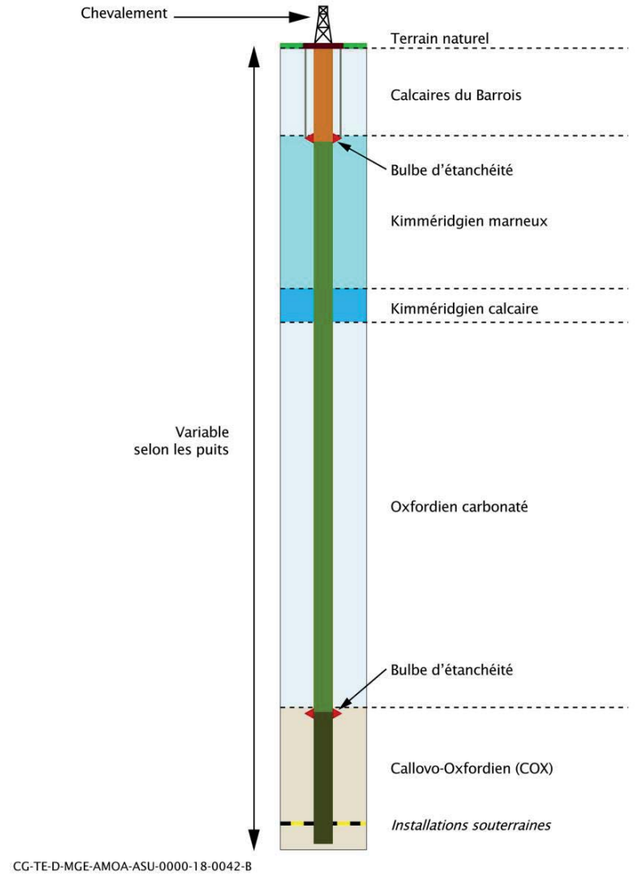


Figure 3-13 Vue d'ensemble d'un puits (principe)-

b) Les vents extrêmes ou les tornades

Les installations sensibles du centre de stockage sont conçues pour résister à des rafales de vents violents et également à des tornades (jusqu'à plus de 230 $km.h^{-1}$). À titre d'information, la rafale maximale de vent enregistrée à la station de Saint-Dizier a atteint près de 160 $km.h^{-1}$, le 26 décembre 1999.

Pour faire face à une situation de tornade, les installations sensibles sont également dimensionnées pour résister au choc lié à des projectiles tels qu'un véhicule qui serait garé à proximité ou des éléments d'acier. Enfin, les ouvertures, comme les bouches de ventilation, sont pourvues de chicanes afin d'éviter qu'un projectile ne puisse endommager des équipements présents à l'intérieur des installations nucléaires.

La ventilation peut être sensible aux effets du vent. Ainsi, des dispositions spécifiques sont retenues. Il s'agit en particulier :

- de la redondance et la ségrégation géographique des ventilateurs de soufflage et d'extraction de la ventilation de l'installation souterraine ;

- du dimensionnement de la ventilation nucléaire des installations de surface et souterraine en tenant compte des pertes de charges dues à des vents extrêmes ;
- de chicanes sur les ouvertures, comme les bouches de ventilation, afin d'éviter qu'un projectile ne puisse endommager des équipements présents à l'intérieur de l'installation nucléaire ;
- de l'orientation des prises d'air et des émissaires de rejets en fonction du sens des vents dominants sur le site.

Il est à noter qu'il est possible d'arrêter provisoirement la ventilation le temps de l'évènement sans remettre en cause la sûreté du centre de stockage Cigéo. Les opérations d'exploitation des installations sont arrêtées et ces installations sont mises en sécurité (dépose des colis de déchets, mise en confinement statique des locaux contenant des substances radioactives) avant cet arrêt de ventilation.

Ces dispositions permettent de maîtriser les risques liés aux vents forts et aux tornades.

c) La neige abondante

Les installations sensibles sont dimensionnées pour résister une accumulation importante de neige sur les toitures.

Ce dimensionnement est défini dans le respect de règles dites « neige et vents » qui précisent les conditions dans lesquelles les charges apportées par la neige et les efforts du vent doivent être pris en compte dans la conception des structures du clos et du couvert des constructions. Certains bâtiments, comme le bâtiment nucléaire de surface et l'une des deux usines de ventilation est en outre conçue pour résister à des chargements beaucoup plus importants (notamment la résistance à la chute d'avions).

En complément, les prises d'air de la ventilation sont toutes situées en hauteur pour éviter les risques d'obstruction. Cette disposition permet de garantir les fonctions de sûreté accomplies par la ventilation des installations sensibles.

Sur alerte vigilance de Météo France, les installations sont mises en sécurité et les accès sont déneigés.

d) Les températures très chaudes ou très froides

Description

Les risques liés aux températures très chaudes ou très froides sont essentiellement associés au risque de perte de la ventilation lié à une défaillance de l'alimentation électrique ou des équipements de ventilation sensibles aux températures très chaudes ou très froides.

Les installations nucléaires sont conçues pour fonctionner sur des plages de température très larges, de -15 °C à +35 °C en continu.

Les plages de températures retenues dans le cadre des températures très chaudes et très froides sont établies sur des températures minimales et maximales avec une période de retour de plus de 100 ans.

Les plages de températures retenues sont de -20 °C à +40 °C sur une période de sept jours.

Par ailleurs, des températures très chaudes et très froides sur une très courte durée (24 heures) sont également retenues. Ces températures sont obtenues en appliquant une marge forfaitaire de ± 5 °C aux températures très chaudes et très froides sur une période de 7 jours. Ainsi, les plages de températures sur une période de 24 heures sont de -25 °C à 45 °C.

Ces plages de températures permettent de couvrir les vagues de chaleur et de froid qui pourraient être de plus en plus fréquentes en lien avec le changement climatique et des températures extrêmes qui pourraient survenir une fois tous les 100 ans environ.

Dispositions de maîtrise des risques

La forte inertie des ouvrages en béton armé, dont une grande partie est enterrée, fait qu'ils sont peu sensibles à des températures extrêmes.

Certains matériels électriques sont sensibles au respect d'une plage de température d'ambiance pour leur fonctionnement (généralement, en deçà de +40 °C pour les équipements sensibles pour éviter le risque de surchauffe ou de panne). Ces matériels, lorsqu'ils assurent une fonction importante pour la protection des colis de déchets, sont dans des locaux techniques disposant d'une ventilation conventionnelle, renforcée aux agressions externes au même titre que la ventilation nucléaire et d'un système de refroidissement de l'air asservi à la température externe.

En cas de risque d'atteinte d'une température très élevée de l'air extérieur (alerte météo France par exemple), les opérations sensibles (comme la manutention des colis de déchets radioactifs) pourront être arrêtées.

e) La foudre

Les installations sensibles sont équipées de dispositifs de capture, d'une mise à la terre de tous les équipements métalliques conducteurs, de parafoudres sur les lignes haute tension et de parasurtenseurs au niveau des armoires électriques.

Ces équipements permettent d'éviter le déclenchement d'un incendie lié à la foudre. Le risque d'incendie sur les équipements électriques fait tout de même l'objet de dispositions de prévention, de protection et de limitation des conséquences.

f) Le feu de forêt

Afin d'éviter la propagation d'un éventuel feu de forêt aux installations, des bandes de plusieurs dizaines de mètres sont prévues et entretenues en prairie calcicole (pelouse rase).

La zone descenderie, sur laquelle est implantée l'installation nucléaire de surface située en zone agricole, et à distance de forêts.

En cas de feu de forêt à proximité de la zone puits, les équipes d'intervention incendie et de secours seront rapidement sollicitées, notamment pour arroser et protéger les abords afin d'éviter tout risque de propagation aux installations.

3.5 Les situations retenues

Dans le cadre de la démarche de sûreté, il faut vérifier que les dispositions mises en place sont suffisantes pour garantir le respect des fonctions de sûreté.

Cette vérification est réalisée par l'identification des situations incidentelles et accidentelles et l'estimation des conséquences radiologiques des situations enveloppes sur l'installation en termes de rejets notamment.

Compte tenu de l'ensemble des lignes de défenses mises en place, les situations enveloppes retenues concernent :

- des chutes de colis de déchets en cours de manutention ;
- des collisions d'équipements de transfert de colis de déchets ;
- des incendies à proximité de colis de déchets.

Des situations accidentelles liées à des aléas externes tels qu'un séisme ou une chute d'avion sur un bâtiment ont également été identifiées. Ces situations sont maîtrisées de par les dispositions de sûreté intégrées dans la conception. À titre d'exemple, les risques d'une chute d'avion sont maîtrisés compte tenu notamment du dimensionnement du génie civil des bâtiments.

Les principales situations incidentelles et accidentelles retenues sont présentées dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Bilan des principales situations retenues

Phase de procédé	Situation	Classement de la situation
Réception des colis de déchets radioactifs	Chute de 2 m d'un emballage de transport manutentionné au pont portique lors de son transbordement du convoi vers le lorry, suite à une erreur humaine	Incidentelle/accidentelle
	Chute de 6 m d'un emballage de transport sans capots manutentionné au pont roulant lors de son basculement dans la fosse, cumulé à la défaillance du système amortisseur	Accidentelle plus sévère
Contrôle et préparation des colis de déchets radioactifs	Chute de 6 m d'un colis primaire déchargé au pont roulant dans un emballage de transport suite à une défaillance matérielle de la chaîne de levage	Incidentelle/accidentelle
	Incendie du chariot impliquant un colis primaire au poste de contrôle	Incidentelle/accidentelle
	Chute de 6 m d'un colis primaire déchargé au pont roulant dans un emballage de transport suite à une défaillance matérielle de la chaîne de levage avec perte de confinement des colis primaires qualifiés à une chute inférieure à 9 m	Accidentelle plus sévère
	Incendie du chariot impliquant un colis primaire au poste de contrôle cumulé à la défaillance de l'extinction	Accidentelle plus sévère
Mise en place des colis de déchets radioactifs dans les hottes de transfert	Chute de 1,2 m d'un colis de stockage suite à une défaillance matérielle de la chaîne de levage avec perte de confinement des colis primaires qualifiés à une chute inférieure à 2 m	Accidentelle plus sévère
Transfert des colis de déchets radioactifs dans l'installation souterraine	Collision du transfert incliné en gare basse à petite vitesse cumulée à la défaillance des butoirs amortisseurs	Accidentelle plus sévère
Stockage des colis de déchets radioactifs	Chute d'un colis de stockage suite à une défaillance de l'élévateur cumulée à la défaillance de l'amortisseur	Accidentelle plus sévère
	Chute d'un colis de stockage suite à une défaillance de l'élévateur	Incidentelle/accidentelle
	Incendie du pont stockeur impliquant un colis de stockage	Incidentelle/accidentelle
	Incendie du pont stockeur impliquant un colis de stockage cumulé à la défaillance d'un conteneur de stockage	Accidentelle plus sévère

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

Parmi les situations accidentelles plus sévères, celles entrainant une dissémination de substances radioactives jugées enveloppes en termes de conséquences radiologiques au public sont les suivantes :

- une chute de 6 m au niveau du local de déchargement dans le bâtiment nucléaire de surface d'un emballage de transport contenant des colis de déchets MA-VL et sans son capot lors de son basculement dans la fosse, cumulée à la défaillance de l'amortisseur de chute ;
- un incendie d'un pont stockeur en alvéole de stockage à proximité de colis de déchets MA-VL entrainant une dispersion des substances radioactives contenues dans les colis de déchets.

3.6 Les évaluations des conséquences de situations accidentelles

3.6.1 L'accident de chute de colis de déchets radioactifs

a) Présentation

Cet accident correspond à la situation accidentelle plus sévère du tableau 3-2 suivant : « Chute de 6 m d'un emballage de transport sans capots manutentionné au pont roulant lors de son basculement dans la fosse, cumulé à la défaillance du système amortisseur ».

Lors des opérations de basculement, l'emballage de transport avec ses colis de déchets est repris au pont pour assurer son déplacement à la verticale à l'aplomb de la fosse pour une dépose sur le chariot préalablement équipé d'un châssis d'accostage. La préhension de l'emballage s'effectue à l'aide d'un palonnier muni d'un système de verrouillage.

Cet accident suppose en premier lieu une défaillance de la chaîne de levage ou un défaut d'accrochage de l'emballage de transport contenant des colis de déchets radioactifs qui peut conduire à sa chute d'une hauteur inférieure à 6 m lors de son transbordement.

L'installation est dimensionnée à la chute de l'emballage de transport sans ses capots dans la fosse grâce à un dispositif amortisseur en fond de fosse qui reprend la fonction des capots.

Il est également postulé la défaillance de l'amortisseur de telle sorte que l'emballage et ses colis de déchets à l'intérieur sont susceptibles de perdre leur confinement entrainant une dissémination de substances radioactives à l'extérieur du bâtiment nucléaire de surface.

b) Hypothèses et données d'entrée

Le potentiel de contamination retenu est estimé sur la base de :

- la prise en compte de colis de déchets MA-VL non qualifiés à une chute de 6 m ;
- la prise en compte d'un taux de remise en suspension en cas de chute selon la famille de colis primaires (fonction de la nature de l'enveloppe et du déchet conditionné) ;
- la prise en compte de la famille de colis de déchets MA-VL susceptible de conduire à des conséquences radiologiques les plus importantes.

La hauteur de rejet (émissaire du bâtiment nucléaire de surface EP1) est de 17 m.

c) Évaluation des conséquences radiologiques

Sur la base des hypothèses et données d'entrée et de la méthodologie de calculs présentées au chapitre 3.1, les conséquences radiologiques sont évaluées à l'aide de la plateforme CERES®.

L'impact maximal à long terme (dose intégrée sur 50 ans pour l'adulte et sur 70 ans pour l'enfant) en considérant dans le bâtiment nucléaire de surface une chute de 6 m d'un emballage de transport sans

capot lors de son basculement dans la fosse, cumulé à la défaillance du système amortisseur est inférieur à 5 mSv.

3.6.2 L'accident lié à un incendie en alvéole de stockage à proximité de colis de déchets radioactifs MA-VL

a) Présentation

Cet accident correspond à la situation accidentelle plus sévère du tableau 3-2 suivant : « Incendie du pont stockeur impliquant un colis de stockage cumulé à la défaillance d'un conteneur de stockage ».

Cet accident considère un incendie du pont stockeur (cf. Figure 3-14) dans la partie utile d'un alvéole de stockage MA-VL cumulé à une défaillance du colis de stockage impliquant une remise en suspension des substances radioactives contenues à l'intérieur d'un colis primaire.

Il est postulé d'une part un départ de feu sur un coffret électrique du pont stockeur de l'alvéole de stockage MA-VL qui se propage aux équipements du pont et d'autre part deux défaillances complémentaires cumulées pouvant conduire à une dissémination de substances radioactives : le système d'extinction embarqué sur le pont est considéré, de manière conservative, inopérant et le colis perd sa capacité de confiner les substances radioactives. Il y a alors une remise en suspension de substances radioactives dans la partie utile de l'alvéole de stockage MA-VL.

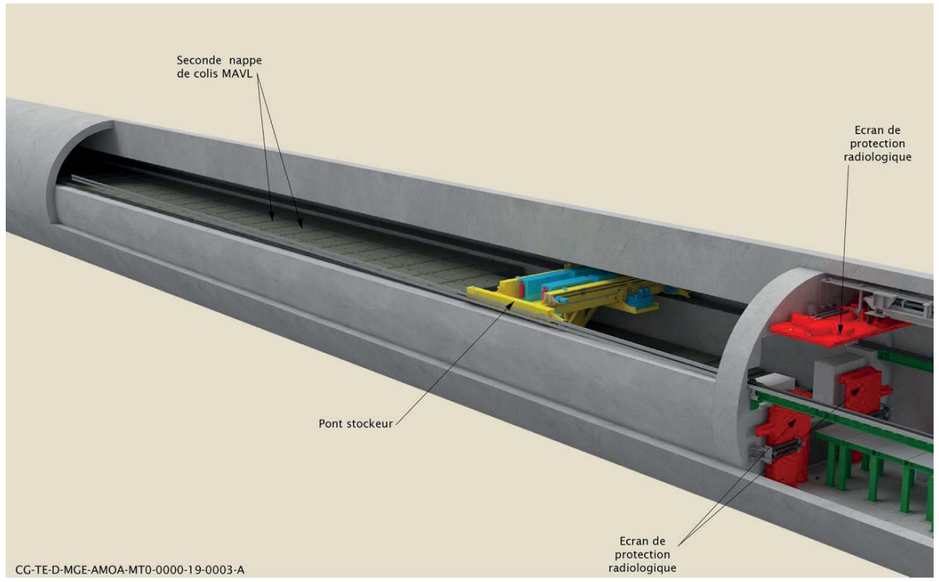


Figure 3-14 Pont stockeur dans la partie d'un alvéole de stockage MA-VL

Sur détection de l'incendie par les systèmes de surveillance présents, la ventilation de soufflage dans l'alvéole est arrêtée par la fermeture des clapets coupe-feu sur le réseau de soufflage de l'alvéole. La ventilation d'extraction est maintenue autant que possible afin de conserver la filtration des substances radioactives éventuellement remises en suspension.

La ventilation d'extraction est toutefois stoppée lorsqu'il n'est plus possible de maintenir de bonnes conditions de filtration (en cas de colmatage des filtres par la fumée de l'incendie par exemple).

Ensuite, malgré le confinement statique assuré par les parois de l'alvéole de stockage, il est considéré que des substances radioactives peuvent passer à travers cette paroi, se propager via la ventilation des galeries de liaison à la sortie de l'alvéole et être rejetées par l'émissaire de ventilation de l'installation souterraine de la zone puits sans avoir été filtrées.

b) Hypothèses et données d'entrée

Les principales hypothèses retenues sont :

- une mobilisation des substances radioactives présentes dans un colis de déchets ;
- une prise en compte de taux de remise en suspension en cas d'incendie ;
- une hauteur de rejet (émissaire de rejet de la zone puits) de 12 mètres ;
- un relâchement des substances radioactives vers la galerie d'accès par les parois de l'alvéole et de la cellule de manutention limité (1 % de l'activité présente dans l'alvéole est dispersée).

La durée de l'accident et donc de rejet de substances radioactives à l'émissaire de la zone puits est prise égale à 30 min (ce temps correspond au temps d'intervention).

c) Évaluation des conséquences radiologiques

L'impact maximal à long terme (dose intégrée sur 50 ans pour l'adulte et sur 70 ans pour l'enfant) d'une situation peu vraisemblable d'un incendie du pont stockeur impliquant un colis de stockage MA-VL cumulé à la défaillance du conteneur de stockage est inférieur à 10 mSv.

3.6.3 La synthèse des conséquences

Les conséquences pour les principaux scénarios accidentels sont présentées dans le tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Bilan des conséquences radiologiques maximales au public pour les principaux situations incidentelles et accidentelles retenues

Phase de procédé	Situation	Classement de la situation	Impact maximal court terme (mSv)	Impact maximal long terme (mSv)
Réception des colis de déchets radioactifs	Chute de 2 m d'un emballage de transport manutentionné au pont portique lors de son transbordement du convoi vers le lorry (suite à une erreur humaine)	Incidentelle/accidentelle	<< 1	<< 1
	Chute de 6 m d'un emballage de transport sans capots manutentionné au pont roulant lors de son basculement dans la fosse cumulé à la défaillance du système amortisseur	Accidentelle plus sévère	-	< 5
Contrôle et préparation des colis de déchets radioactifs	Chute de 6 m d'un colis primaire déchargé au pont roulant dans un emballage de transport suite à une défaillance matérielle de la chaîne de levage	Incidentelle/accidentelle	<< 1	<< 1
	Incendie du chariot impliquant un colis primaire au poste de contrôle	Incidentelle/accidentelle	< 1	< 1

Phase de procédé	Situation	Classement de la situation	Impact maximal court terme (mSv)	Impact maximal long terme (mSv)
	Chute de 6 m d'un colis primaire déchargé au pont roulant dans un emballage de transport suite à une défaillance matérielle de la chaîne de levage avec perte de confinement des CP qualifiés à une chute inférieure à 9 m	Accidentelle plus sévère	-	<<1
	Incendie du chariot impliquant un colis primaire au poste de contrôle cumulé à la défaillance de l'extinction	Accidentelle plus sévère	-	< 1
Mise en place des colis de déchets dans les hottes de transfert radioactifs	Chute de 1,2 m d'un colis de stockage suite à une défaillance matérielle de la chaîne de levage avec perte de confinement des colis primaires qualifiés à une chute inférieure à 2 m	Accidentelle plus sévère	-	<<1
Transfert des colis de déchets radioactifs dans l'installation souterraine	Collision du transfert incliné en gare basse à petite vitesse cumulée à la défaillance des butoirs amortisseurs	Accidentelle plus sévère	-	<<1
Stockage des colis de déchets radioactifs	Chute d'un colis de stockage suite à une défaillance de l'élévateur cumulée à la défaillance de l'amortisseur	Accidentelle plus sévère	-	<<1
	Chute d'un colis de stockage suite à une défaillance de l'élévateur	Incidentelle/accidentelle	<< 1	<< 1
	Incendie du pont stockeur impliquant un colis de stockage	Incidentelle/accidentelle	< 1	< 1
	Incendie du pont stockeur impliquant un colis de stockage cumulé à la défaillance d'un conteneur de stockage	Accidentelle plus sévère	-	<10

Les niveaux d'exposition pour les accidents les plus sévères sont inférieurs à la dose repère des pouvoirs publics pour décider en cas d'accident, et au cas par cas, de la mise à l'abri des populations qui correspond à un impact court terme de 10 mSv.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté en exploitation

3.7 La gestion des situations accidentelles/post-accidentelles

Pour chacune des situations accidentelles identifiées (voir chapitre 3.5), les dispositions de maitrise des risques mises en place permettent leur gestion ainsi que le maintien ou le retour de l'installation dans un état dit « sûr » à l'issue de la situation envisagée.

MISE À L'ÉTAT SÛR ET MAINTIEN DE L'ÉTAT SÛR

L'état sûr d'une installation est un état dans lequel toutes les fonctions de protection issues de l'arrêté du 7 février 2012, sont assurées afin de protéger le personnel, l'installation et l'environnement.

La mise à l'état sûr de l'installation est un état transitoire dans lequel la maitrise des fonctions de protection n'est que temporaire.

Le maintien à l'état sûr correspond à des conditions stables et contrôlées de l'installation pouvant être maintenues indéfiniment avec la garantie de la maîtrise des fonctions de protection.

L'analyse de l'état de l'installation après un accident permet de décider des conditions associées à la reprise de l'exploitation. Dans le cas d'un accident dans l'installation souterraine et plus particulièrement en alvéole de stockage, il s'agit notamment d'examiner l'intérêt de retirer ou non le colis ou les colis incriminés.

Différentes situations en lien avec l'état des colis et la capacité des équipements pourraient être envisagées :

- la reprise de colis est possible avec les moyens d'exploitation courants ;
- la reprise de colis nécessite des dispositions adaptées ;
- la reprise de colis n'est pas justifiée en regard des risques induits sur le personnel en cas de retrait et de la vérification que l'exploitation peut continuer en respectant les exigences de protection pour l'ensemble des phases de vie.

Concernant les dispositions permettant la gestion des situations accidentelles/post accidentelles liés à des chutes ou des collisions, les colis de déchets, emballages de transport et hottes de manutention compte tenu de leur nature et de leur dimensionnement restent manutentionnables après l'événement.

Les équipements nécessaires à cette manutention dépendent de chaque situation : ceux-ci peuvent être les équipements à disposition ou bien être spécifiques. Par exemple, pour un accident en alvéole MA-VL, un équipement spécifique peut se substituer à l'équipement présent de stockage sur le pont stockeur, celui-ci étant capable de repérer la position du colis afin de le repositionner pour le récupérer.

Concernant les situations d'incendie, les colis de déchets, emballages de transport et hottes de manutention restent également manutentionnables suite à l'événement. Pour les structures, un incendie n'est pas susceptible de causer leur effondrement. Les équipements de manutention des colis (ponts et engins de transfert sur rails), bien que non fonctionnels post incendie, sont dimensionnés pour maintenir leur charge de manière sécurisée et disposent de moyens de secours afin d'affaler leur charge et d'être rapatriés suite à l'accident (lièvres de manutention, anneaux de tractage…).

Dans le cas d'un séisme, l'exploitation de l'installation est arrêtée sans que les fonctions de sûreté ne soient remises en cause. La reprise de l'exploitation est soumise à minima à un état des lieux de l'installation permettant de vérifier notamment le bon fonctionnement (tests, essais…) des équipements importants pour la sûreté et l'absence de dégâts importants sur le génie civil des locaux et ouvrages, les voies de roulement des équipements de transfert et de manutention, et sur les colis en alvéole de stockage.

Concernant la chute d'un avion sur le bâtiment nucléaire de surface, les dispositions de conception assurent une résistance des voiles et dalles bétons extérieurs à l'impact de l'avion. Les cibles de sûreté ne sont pas atteintes. L'intervention des secours est déclenchée pour éteindre l'incendie consécutif à la chute de l'avion. La reprise de l'exploitation est subordonnée à l'état du bâtiment post-accidentel.

3.8 Les éléments importants pour la protection en exploitation

L'arrêté du 7 février 2012 dit « arrêté INB » fixe les exigences vis-à-vis de la définition et de la gestion des éléments importants pour la protection des intérêts (EIP) mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement c'est-à-dire la sécurité, la santé et la salubrité publiques, la protection de la nature et de l'environnement (14).

Il définit un EIP comme une structure, un équipement, un système (programmé ou non), un matériel, un composant ou un logiciel présent dans une installation nucléaire de base ou placé sous la responsabilité de l'exploitant, assurant une fonction nécessaire à la démonstration mentionnée au deuxième alinéa de l'article L. 593-7 du code de l'environnement.

L'identification d'un élément comme « important pour la protection » entraîne la mise en œuvre de dispositions spécifiques de conception, de fabrication, de construction, de montage, d'essais, d'exploitation, de maintenance, de contrôle, de modification, etc.

Une première liste d'EIP est établie au stade du DOS. À titre d'exemple, on peut citer :

- les colis primaires de déchets radioactifs et les conteneurs de stockage ;
- des équipements/matériels participant à la protection radiologique : portes de radioprotection, bouchons des alvéoles HA ;
- les hottes de transfert des colis de déchets radioactifs ;
- la ventilation nucléaire de certains locaux du bâtiment nucléaire de surface ;
- la ventilation nucléaire des alvéoles de stockage MA-VL.

4

L'évaluation de sûreté après fermeture

4.1 La démarche générale 114
4.2 Les risques à long terme après fermeture 127
4.3 Les incertitudes résiduelles de connaissance 130
4.4 Les scénarios de sûreté après fermeture retenus 138
4.5 Les évaluations quantitatives des scénarios de sûreté après fermeture retenus 140
4.6 Les composants importants pour la protection à long terme 153
4.7 Les activités de contrôles et surveillance mises en place dès la construction initiale en vue de la protection à long terme après fermeture 157

4.1 La démarche générale

L'évaluation de la sûreté après fermeture est réalisée autour de trois objectifs :

- la vérification du caractère favorable, pour la sûreté, des performances des composants du système de stockage participants aux fonctions de sûreté ;
- l'évaluation des perturbations apportées dans le système de stockage par les interactions entre les différents composants ;
- l'estimation des incidences sur la santé de l'homme pour un jeu de scénarios représentatifs des évolutions potentielles du système de stockage.

Pour atteindre ces objectifs, la démarche de sûreté mise en œuvre suit les recommandations du guide n° 1 de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 8 février 2008 (8) qui stipule que :

- « *La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assignée au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques.* » ;
- « *Après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance ou d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée.* » ;
- « *En conséquence, le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte que sa sûreté après fermeture soit assurée de façon passive afin de protéger les personnes et l'environnement des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.* » ;
- « *À cet égard, le concept retenu pour le stockage devra permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques, et des facteurs économiques et sociaux* ».

En premier lieu, la démarche de sûreté après fermeture se fonde sur l'analyse du comportement du système de stockage tel qu'il peut être décrit au vu de l'état des connaissances scientifiques et technologiques afin de vérifier l'efficacité des composants vis-à-vis des fonctions de sûreté après fermeture.

En second lieu, la démarche s'attache à évaluer les risques que des fonctions de sûreté après fermeture ne soient pas atteintes.

Pour cela, l'approche s'appuie sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques (cf. Chapitre 1), pour évaluer d'une part les perturbations apportées par les composants ouvragés du stockage sur le Callovo-Oxfordien, et d'autre part les risques de défaillances des composants ouvragés. Elle structure, organise, hiérarchise et évalue qualitativement l'état de la connaissance et les incertitudes résiduelles au moment de l'analyse. À l'issue, un ensemble de scénarios représentant les différentes évolutions du stockage sur le long terme sont définis.

On définit ainsi une évolution du comportement du système de stockage (le global et le détail : stockage en grand, quartiers, alvéoles, déchets) et de son environnement géologique (le global et le détail : site et milieu géologique en grand, couche du Callovo-Oxfordien en grand, couche du Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage) dans le temps sur une période de l'ordre du million d'année, au mieux des connaissances et tel que le stockage a été conçu. Cette évolution considère les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, les dispositions d'architecture du stockage retenues, ainsi que les composants ouvragés que sont les colis de stockage et les scellements qui évoluent comme prévu et ont les performances qui leur sont attribuées. L'évaluation des conséquences de cette évolution se fonde sur une évaluation des phénomènes physico-chimiques qui interviennent sur le long terme dans le stockage, la couche du Callovo-Oxfordien et le milieu géologique en général, et *In fine* des voies de transfert des substances radioactives jusqu'aux exutoires et la biosphère.

Cette évaluation intègre la connaissance :

- du comportement des colis de stockage dans le temps en présence d'eau et dans l'environnement du stockage et de la manière (cinétique, quantité, forme) avec laquelle les radionucléides sont relâchés par les colis ;
- des phénomènes qui régissent la migration des substances radioactives dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, en regard de leurs formes physico-chimiques (rétention et solubilité) ;
- de la migration à long terme des substances radioactives mobiles résiduelles qui sortent de la couche du Callovo-Oxfordien vers différents exutoires[29]. Pour ces quelques éléments mobiles qui arriveraient potentiellement à un exutoire, l'exposition humaine associée est évaluée. Compte tenu des échelles de temps allant au-delà de dizaines de milliers d'années, les hypothèses retenues correspondant à des groupes de personnes « hypothétiques » conformément aux pratiques internationales, notamment le programme AIEA BIOMASS, et au guide n° 1 de l'ASN-de 2008 (8, 12).

Ce travail débouche, *In fine*, sur des évaluations quantitatives de la performance[30] des composants ainsi que la performance globale via des indicateurs (évaluation de la concentration d'un radionucléide dans le temps, évaluation du ratio entre la part de radionucléides passant par les ouvrages souterrains, et ceux passant par la roche hôte, distribution de la quantité de radionucléides peu mobiles dans le stockage et la couche en fonction du temps...).

Ces évaluations permettent de porter un jugement sur la performance des composants ouvragés du stockage et de la roche hôte dans laquelle est implanté le stockage vis-à-vis des fonctions de sûreté à assurer. Elles constituent également un test de la robustesse d'ensemble du stockage (composants ouvragés du stockage, formation hôte assurant la sûreté à long terme), de son évolution, ce qui est une condition importante de la confiance dans le processus d'évaluation. Le transfert potentiel des radionucléides dans les différents compartiments du stockage est également évalué, et *In fine* les éventuelles incidences du stockage sur l'homme et l'environnement pour les quelques radionucléides mobiles et à vie longue qui sortiraient de la formation hôte.

Pour atteindre les objectifs de l'évaluation de la sûreté après fermeture, la démarche se fonde, tel que recommandé par le guide, sur un jeu de scénarios représentatifs des évolutions potentielles du système de stockage :

- l'évolution de référence du stockage, qualifiée d'évolution normale du stockage, qui permet de vérifier le caractère favorable, pour la sûreté, des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté ;
- des situations de déviations par rapport à l'évolution normale qui permettent de vérifier la robustesse du stockage sur le long terme en cas de non réalisations de fonctions de sûreté qui pourraient être induites par exemple par les perturbations apportées dans le système de stockage par les interactions entre les différents composants.

[29] L'essentiel des substances radioactives reste confiné dans le stockage ou migre en champ proche du stockage sur quelques mètres environ. Seuls quelques radionucléides à vie longue et dits mobiles car solubles et sans rétention, comme l'Iode 129, migrent du stockage vers et au travers de la couche du Callovo-Oxfordien, mais de manière lente et limitée du fait du mode de transfert dominant par diffusion et de la garde importante de Callovo-Oxfordien (plusieurs dizaines de mètres) de part et d'autre du stockage.

[30] La performance s'entend au sens des fonctions de sûreté déclinant l'objectif fondamental de sûreté. Ainsi, la fonction de sûreté de la roche hôte est de limiter la migration des radionucléides qui seraient relâchés hors du stockage. La performance de la roche hôte renvoie à des indicateurs qui traduisent cette fonction de sûreté, par exemple la quantité relative de radionucléides qui traverseraient éventuellement le roche hôte dans le temps.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté après fermeture

L'ÉVALUATION DE SÛRETÉ APRÈS FERMETURE

Elle comprend quatre grandes étapes :

- l'analyse du socle de connaissance des caractéristiques et du comportement dans le temps des composants naturels et ouvragés et l'identification des incertitudes résiduelles ;
- l'analyse des risques de l'absence de réalisation des fonctions de sûreté ;
- l'identification et la définition des scénarios pertinents, ainsi que leur classification ;
- une évaluation quantitative de scénarios d'évolution du système de stockage dans le temps à l'aide d'indicateurs appropriés pour vérifier la bonne performance des composants naturels et ouvragés. L'évaluation quantitative permet de porter un jugement d'une part sur la bonne réalisation des fonctions de sûreté en évaluation normale et d'autre part sur la robustesse d'ensemble du système de stockage en cas de non réalisation d'une fonction. Elle permet aussi d'évaluer les éventuelles incidences sur l'homme.

4.1.1 Une démarche encadrée par le guide n° 1 de l'ASN de 2008 et cohérente avec les pratiques internationales

Pour mener cette évaluation, la démarche de sûreté mise en œuvre pour l'évaluation de sûreté après fermeture suit les recommandations du guide de sûreté de l'ASN de 2008 (8).

Elle s'appuie également sur un retour d'expérience important lié à des échanges multiples menés depuis les années 90, dans le cadre d'exercices internationaux. L'Andra a pu ainsi se comparer régulièrement à ses homologues et s'assurer que sa démarche de sûreté était cohérente avec les pratiques internationales.

L'Andra a notamment participé à plusieurs ateliers de travail avec des experts internationaux sur les scénarios de sûreté dont celui de 2015, sous l'égide de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), qui a lui permis de conforter sa démarche en matière de développement et définition des scénarios.

4.1.2 Les scénarios de sûreté après fermeture

Les scénarios de sûreté après fermeture sont définis pour représenter la manière dont les substances radioactives contenues dans les déchets sont susceptibles d'arriver jusqu'à l'homme.

Ils visent à étudier et justifier la robustesse de la démonstration de sûreté du stockage. Leur définition constitue la base fondamentale pour les évaluations quantitatives de la performance des dispositions mises en place vis-à-vis de la protection de l'homme et l'environnement.

Les scénarios de sûreté après fermeture sont généralement regroupés en quatre classes génériques[31] :

- **un scénario d'évolution normale** qui vise à représenter le stockage tel que conçu en tirant partie de l'état de la connaissance scientifique et technologique acquis sur les comportements du Callovo-Oxfordien et des composants du stockage à long terme une fois fermé. Il vise à vérifier le bon fonctionnement du stockage dans le temps ;
- **un ensemble de scénarios qui permet de couvrir différentes déviations de cette évolution normale** :
  - ✓ **des scénarios « d'évolution altérée »** représentatifs d'événements ou processus jugés peu vraisemblables au regard de l'état de la connaissance. Se rangent dans cette classe les scénarios correspondant à des pertes de fonctions des composants du système de stockage (exemple des scellements) ;

[31] Ces quatre catégories sont cohérentes avec les pratiques internationales (WORKSHOP SCENARIO AEN https://www.oecd-nea.org).

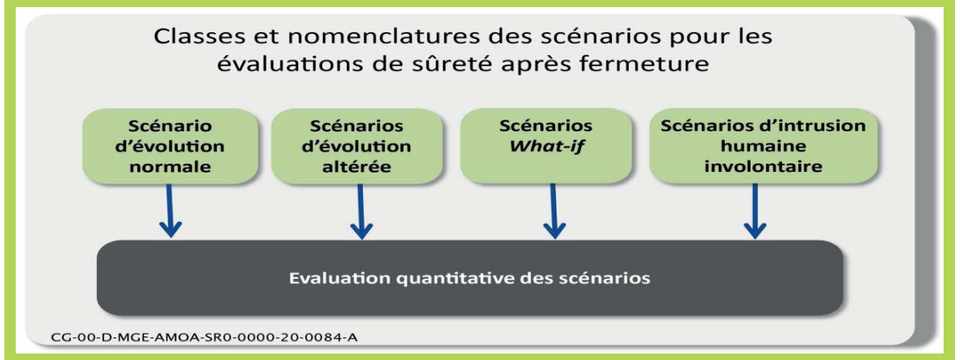
- ✓ **des scénarios qualifiés de « *What-if* »** reposant sur un caractère très peu vraisemblable des événements pris en compte, ou reposant sur des événements postulés pour considérer par exemple la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté. Ces scénarios hypothétiques permettent de « pousser » à l'extrême certains dysfonctionnements et de montrer la robustesse du système de stockage dans sa globalité.
- ✓ **les scénarios d'intrusion humaine involontaire, nommés SIHI**, dans la zone d'implantation des ouvrages de stockage, par méconnaissance de son existence[32].

Les scénarios de sureté après fermeture

Les scénarios après fermeture décrivent l'ensemble des voies de transfert susceptibles d'être empruntées par les substances radioactives relâchées par les colis de déchets hors du stockage et jusqu'à l'homme.

Ils sont classés en quatre grandes catégories :

- le scénario d'évolution normale ;
- les scénarios d'évolution altérée ;
- les scénarios « *What-if* » ;
- les scénarios d'intrusion humaine involontaire (nommés « SIHI »).



Les scénarios sont issus de l'analyse des risques et incertitudes.

4.1.3 L'analyse des risques et incertitudes

L'analyse dite des risques et incertitudes consiste en une analyse qualitative de l'ensemble des risques et incertitudes résiduelles portant sur le fonctionnement du stockage lors de la phase long terme après fermeture. Cette analyse se fonde sur l'état des connaissances scientifiques et technologiques disponible et au regard des fonctions de sûreté que doivent assurer les composants (naturels et ouvragés) du système de stockage après-fermeture et à long terme.

À l'issue de cette analyse du comportement du stockage tel qu'il peut être décrit au vu du socle de connaissances scientifiques et technologiques et des incertitudes résiduelles associées, sont identifiés les scénarios de sûreté après fermeture qui seront évalués quantitativement en termes d'une part d'indicateurs de performance du stockage en lien avec les fonctions de sûreté et d'autre part d'incidences en particulier sur la santé de l'homme.

[32] Pour rappel, le guide n° 1 de l'ASN de 2008 fixe la date d'oubli de l'existence du stockage à 500 ans (8).

Les itérations connaissances/conception/sûreté visent aussi à réduire en tant que de besoin et possible les incertitudes résiduelles ou à y palier, notamment par des dispositions de conception.

4.1.3.1 La méthodologie

Dans son principe, tel qu'illustré en figure 4-1, l'analyse des risques et incertitudes après fermeture consiste :

- pour les composants contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté :
  - ✓ à identifier si les risques et les incertitudes résiduelles de connaissance sont susceptibles d'affecter ou non la réalisation d'une ou plusieurs fonction(s) de sûreté définie(s) pour la phase long terme après-fermeture.
- pour un composant ne contribuant pas à la réalisation d'une fonction de sûreté :
  - ✓ à examiner l'influence des incertitudes résiduelles de connaissances sur le transfert des substances radioactives vers la biosphère.
- en une appréciation qualitative mais argumentée sur les effets potentiels des risques et incertitudes analysés. Elle permet ainsi d'identifier les causes de dysfonctionnement des composants et d'évaluer s'il peut y avoir une diminution significative des performances attendues de ces composants et engendrer la perte d'une fonction de sûreté ;
- à proposer des modalités de gestion de ces risques et incertitudes :
  - ✓ soit dans le cadre de l'approche itérative entre conception, connaissances et sûreté. Il s'agit alors, lorsque c'est possible, de retenir des dispositions de conception du stockage qui rendent le système peu sensible à ces risques et/ou incertitudes. À titre illustratif, il s'agit du recours à des matériaux dont le comportement est maîtrisé (acier non allié, béton, bentonite etc.) et le recours à un conteneur de stockage HA étanche durant la période thermique, pour se prémunir notamment des incertitudes sur le comportement des substances radioactives en température ;
  - ✓ soit par leur prise en compte dans des scénarios appropriés d'étude de l'évolution du système de stockage à travers des choix d'hypothèses enveloppes (représentation, modèles, données).

Les causes possibles de dysfonctionnement du ou des composant(s) impliqué(s) sont alors identifiées et un jugement qualitatif sur leur vraisemblance et leurs effets est porté en s'appuyant sur la connaissance scientifique et technologique acquise. Cette appréciation conduit à la classification en scénario d'évolution altérée ou en scénario *What-if* :

- si les causes de dysfonctionnement identifiées sont peu vraisemblables, des scénarios d'évolution altérée sont alors définis. Ils visent à évaluer les conséquences de la dérive dans le temps du système de stockage et de vérifier les lignes de défense ;
- si les causes de dysfonctionnement sont très peu vraisemblables des scénarios de type *What-if* sont postulés et définis pour tester la robustesse du système de stockage.

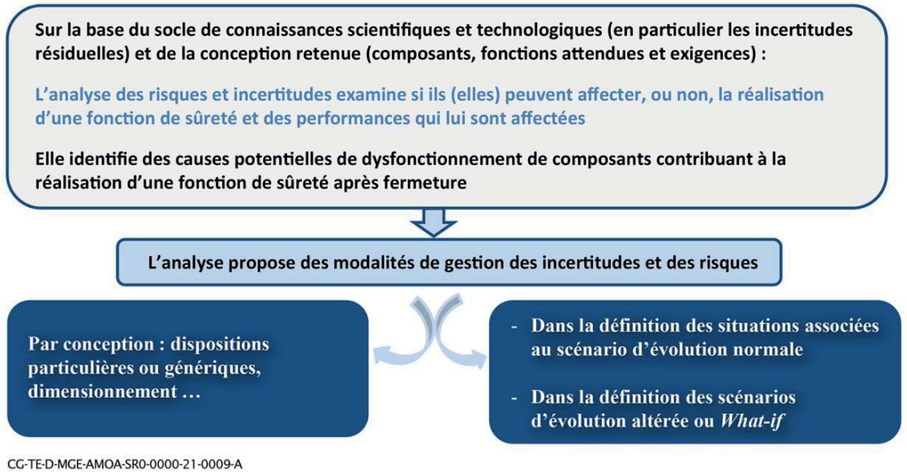


Figure 4-1 *Illustration schématique de l'analyse des risques et incertitudes de connaissances scientifiques et technologiques et des modalités de leur gestion*

Une analyse globale des modes de défaillances pouvant survenir au sein du système de stockage est menée en regard des fonctions de sûreté après fermeture. Chaque fonction de sûreté est analysée afin d'une part d'identifier des causes potentielles de dysfonctionnement communes aux composants contribuant à sa réalisation et d'autre part, d'examiner la possibilité de regroupement de scénarios (cf. Figure 4-2).

En tirant parti de la connaissance scientifique et technologique, et du panorama des incertitudes résiduelles de connaissance et des risques mentionnés aux paragraphes précédents, l'analyse conduit à l'établissement des scénarios pour lesquels les incidences sont évaluées quantitativement.

Chaque itération de sûreté/conception/connaissances pendant le développement du centre de stockage, s'appuie sur les avancées de la connaissance technologique et scientifique relative à l'après fermeture.

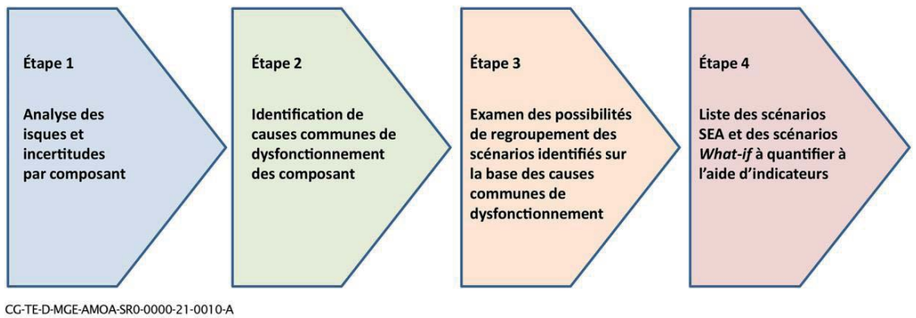


Figure 4-2 *Illustration schématique de l'établissement de la liste de scénarios à quantifier sur la base de l'analyse des risques et incertitudes*

Sur cette base, et de la conception affinée à chaque itération de sûreté, l'analyse conduite permet de définir des scénarios de sûreté et des hypothèses qui se veulent prudentes, afin de tenir compte des incertitudes résiduelles, pour représenter le stockage et son évolution dans le temps.

Ainsi, les incertitudes résiduelles portant sur la connaissance des colis compte tenu de leur variabilité, la connaissance de la couche du Callovo-Oxfordien (domaines de valeurs par exemple de coefficient de rétention), et des processus régissant l'évolution du stockage incluant des événements externes futurs d'origine naturelle ou liés aux activités humaines (changements climatiques naturels ou par émission de gaz à effet de serre par exemple) sont intégrées dans la définition des scénarios identifiés qui sont ensuite évalués quantitativement (cf. Chapitre 1).

L'analyse des risques et incertitudes

L'analyse des risques (internes et externes) et des incertitudes résiduelles de connaissance se fonde sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques et sur la conception retenue.

Elle examine si les risques ou les incertitudes résiduelles peuvent affecter ou non la réalisation d'une fonction de sûreté et des performances qui lui sont affectées.

Elle identifie les causes potentielles de dysfonctionnement de composants contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture.

L'analyse propose des modalités de gestion des risques et incertitudes résiduelles :

- par conception (par des dispositions particulières ou génériques, dimensionnement…) ;
- dans la définition de situations associées au scénario d'évolution normale ;
- dans la définition de scénarios d'évolution altérée ou *What-if.*

Cette analyse présentée en 4.2, contribue à l'identification, à la classification et à la définition des scénarios à travers des choix d'hypothèses enveloppes, qui seront évalués quantitativement en termes d'une part d'indicateurs de performance du stockage en lien avec les fonctions de sûreté et d'autre part d'incidences en particulier sur la santé de l'homme.

4.1.3.2 Panorama des risques et incertitudes

L'ASN indique dans son guide n° 1 de 2008 (8) que : « *la détermination et la prise en compte des incertitudes sont des éléments essentiels de l'analyse de sûreté » (…) « la démonstration de sûreté doit clairement identifier dans quelle mesure les investigations sur le site, les résultats des programmes de recherche, des dispositions de conception, les hypothèses prises pour l'évaluation et les études de sensibilité ont permis d'apprécier les incertitudes et d'en tenir compte. Les incertitudes résiduelles seront appréciées, suivant leur nature, de manière qualitative ou quantitative. Il pourra être fait appel à des jugements d'experts ; la traçabilité de ces jugements devra être établie.* »

La notion de risque est liée à l'occurrence d'un évènement externe (type séisme) ou d'un processus interne (par exemple type perturbation thermique, hydraulique, mécanique, chimique…) au sens d'événements du guide n° 1 de 2008 de l'ASN (8) pour définir les situations à étudier.

La notion d'incertitude est associée à l'état de la connaissance des caractéristiques intrinsèques du système de stockage une fois fermé (la couche du Callovo-Oxfordien, les déchets, les composants ouvragés, les substances radioactives), de son environnement (formations géologiques sus et sous-jacentes et biosphère) et de leurs évolutions après fermeture et à long terme.

a) Le panorama des risques

Après fermeture du stockage, les risques sont classés en deux grandes catégories :

- les risques dits « risques internes » qui sont liés à des perturbations d'origine interne. Ils correspondent aux perturbations d'origine interne (thermique, hydraulique, gaz, mécanique, chimiques, bactériologique et radiologiques), et leurs éventuelles interactions. Ces perturbations sont analysées vis-à-vis de leur impact potentiel sur les fonctions de sûreté du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés ;

- les risques liés à des aléas et activités d'origine externe[33] dits « risques externes », liés aux évolutions des évènements climatiques et géodynamiques (y compris les effets anthropiques sur le climat et l'environnement), à l'aléa sismique et aux intrusions humaines involontaires.

Ces risques sont analysés pour évaluer leur influence sur les fonctions de sûreté, notamment s'ils peuvent conduire à une perte d'une ou plusieurs fonction(s) de sûreté.

b) Le panorama des incertitudes liées à l'état des connaissances sur le long terme

Afin d'estimer le bon fonctionnement du système de stockage et sa robustesse vis-à-vis de l'objectif fondamental de sûreté, l'accent est porté en après fermeture sur l'intégration des connaissances scientifiques et technologiques et la maîtrise des incertitudes résiduelles identifiées.

Les incertitudes résiduelles liées à l'état de connaissances scientifiques et technologiques sont classées en quatre grandes catégories[34] :

- les incertitudes résiduelles de connaissance sur des données d'entrée nécessaires pour concevoir les composants ouvragés du système de stockage dites « incertitudes des données d'entrées ». Ce sont :
  - ✓ d'une part les colis primaires incluant leur inventaire radiologique et leur comportement dans le temps ;
  - ✓ d'autre part le site d'implantation dont la couche du Callovo-Oxfordien, ses formations encaissantes.
- les incertitudes résiduelles de connaissance sur les caractéristiques intrinsèques des composants ouvragés du système de stockage (conteneur de stockage, scellements…) et leur agencement dans l'installation souterraine dites « incertitudes technologiques » ;
- les incertitudes résiduelles de connaissance portant sur l'évolution physico-chimique du système de stockage (couche du Callovo-Oxfordien et composants ouvragés) dites « incertitudes de comportement sur le long terme » ;
- les incertitudes résiduelles de connaissance sur l'évolution à long terme du milieu géologique environnant (hydrogéologie du site…) et de la biosphère.

La démarche retenue pour la classification des incertitudes résiduelles

La très bonne connaissance de la couche du Callovo-Oxfordien et les importants travaux de R&D réalisés sur les composants du système de stockage et leur comportement sur le long terme permettent de cerner les incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques.

Les incertitudes résiduelles sont classées en quatre catégories :

- les incertitudes résiduelles sur la connaissance des données d'entrées ;
- les incertitudes résiduelles technologiques ;
- les incertitudes résiduelles de comportement du système de stockage sur le long terme ;
- les incertitudes résiduelles de connaissance sur l'évolution à long terme du milieu géologique environnant.

Leur prise en compte vise notamment à consolider les hypothèses prises pour l'évaluation de sûreté et le caractère enveloppe des résultats obtenus.

[33] Ces évènements et phénomènes sont qualifiés de FEPs, pour « Feature, Event and Processes », à l'international.
[34] Ces catégories sont cohérentes avec le guide de l'ASN de 2008

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté après fermeture

4.1.4 L'évaluation des conséquences (traitement quantitatif des scénarios de sûreté après fermeture)

4.1.4.1 Objectifs de protection

L'appréciation de l'incidence sur l'homme d'un éventuel transfert des radionucléides vers la biosphère se fonde sur l'évaluation des incidences exprimées en termes de dose, en cohérence avec le guide n° 1 de 2008 de l'ASN (8) qui indique :

Pour le scénario d'évolution normale, les doses efficaces individuelles calculées ne devront pas excéder la valeur de 0,25 mSv/an pour des expositions prolongées liées à des événements certains ou très probables.

Au-delà de cette période (10 000 ans), les incertitudes sur l'évolution de l'environnement du système de stockage augmentent progressivement. Des estimations quantifiées majorantes des expositions individuelles devront néanmoins être faites, éventuellement complétées par des appréciations qualitatives des résultats de ces estimations compte tenu des facteurs d'évolution du milieu géologique, de façon à vérifier que le relâchement des substances radioactives ne conduit pas à des doses inacceptables. Lors de cette vérification, la valeur de 0,25 mSv/an précédemment citée sera conservée comme référence.

Pour les autres scénarios, les expositions individuelles associées doivent être maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes[35].

4.1.4.2 Méthode et outils

Les évaluations quantitatives visent ainsi à mesurer la performance des composants du stockage, en particulier le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien, vis-à-vis de la limitation de la migration des substances radioactives contenues dans les déchets une fois relâchées par les colis.

Les performances des composants du stockage pour retarder et limiter le transfert de ces substances sont évaluées via un ensemble d'indicateurs[36] appropriés (cf. Chapitre 4.1.4.2b).

Enfin, l'évaluation quantitative de ces scénarios permet d'apprécier les incidences à long terme du stockage sur l'homme, exprimées en termes de dose.

a) La conceptualisation des scénarios et les outils de l'évaluation quantitative

Sur la base de la description du scénario, une première étape dite de « conceptualisation » est menée pour réaliser les évaluations quantitatives. Cette conceptualisation permet de représenter l'ensemble des échelles d'espaces à considérer, les différents « compartiments » des ouvrages souterrains, de la couche du Callovo-Oxfordien et son environnement.

L'évaluation quantitative se fonde ensuite sur l'utilisation d'outils numériques capables de modéliser et de quantifier le relâchement des substances radioactives par les colis, leur migration dans les ouvrages souterrains, dans la couche du Callovo-Oxfordien puis les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien (Formations Dogger et Oxfordien) jusqu'aux exutoires (cf. Figure 4-3).

Les données de sortie de cette étape dite de « simulation » permettent d'évaluer quantitativement les indicateurs de performances et les concentrations des substances radioactives arrivant potentiellement aux exutoires (cf. Figure 4-7).

[35] L'Andra retient la valeur de 100 mSv/an
[36] Paramètre quantitatif traduisant les performances et la robustesse du système de stockage en regard des fonctions de sûreté.

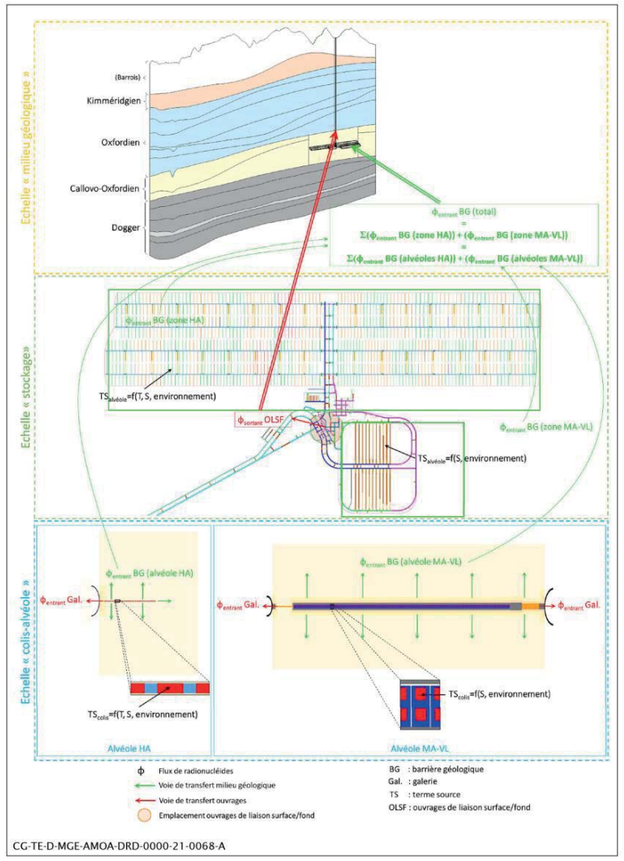


Figure 4-3 *Illustration schématique de la conceptualisation des scénarios après fermeture*

b) La vérification des performances du système de stockage et de sa robustesse

Des indicateurs appropriés permettent d'appréhender le fonctionnement du système de stockage dans son ensemble et de s'assurer :

- du caractère favorable, pour la sûreté après fermeture, des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, roche hôte) puis dans leur ensemble ;
- de la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs composants contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté (composants naturels ou composants ouvragés).

Les indicateurs retenus pour vérifier le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage sont en lien avec des critères d'appréciation de l'atténuation et du retard offert par chaque composant contribuant à la réalisation de fonctions de sûreté du système de stockage. Il s'agit principalement :

- des flux d'eau circulant dans les ouvrages souterrains ;
- des débits molaires de radionucléides au cours du temps à la sortie de chacun des composants (colis, alvéole, scellements, formation-hôte) ;
- de la cartographie des concentrations en substances radioactives en solution dans la couche du Callovo-Oxfordien et/ou dans les formations encaissantes, notamment dans les niveaux aquifères et de son évolution au cours du temps ;
- des bilans de masse des substances radioactives entre les différents composants du système de stockage dans le temps, notamment à un million d'années.

c) L'évaluation des incidences sur l'homme

Cette évaluation représente le dernier maillon de la chaîne de transfert des radionucléides depuis les colis de déchets jusqu'à l'homme. Elle vise la vérification de l'atteinte de l'objectif de protection exprimée en termes de dose.

L'évaluation de l'incidence sur la santé humaine est réalisée en considérant les différentes voies de transfert jusqu'à l'homme (irrigation, eau de boisson, abreuvement des animaux…) via un compartiment dit « biosphère » qui est le dernier maillon pour transformer la concentration, exprimée en Bq/L dans l'eau prélevée à l'exutoire en exposition humaine, dose sur les personnes des groupes hypothétiques considérés, exprimée en mSv/an (cf. Figure 4-4).

Il est également considéré les deux autres voies d'exposition sur l'homme :

- une exposition externe liée à l'irradiation induite par les eaux utilisées provenant d'un forage (eaux supposées être contaminées sur le plan radiologique) du fait de leurs activités à l'extérieur ;
- une exposition par l'inhalation de poussières contaminées sur le plan radiologique issues du sol irrigué avec de l'eau provenant d'un forage et remises en suspension pendant le labour ou le jardinage.

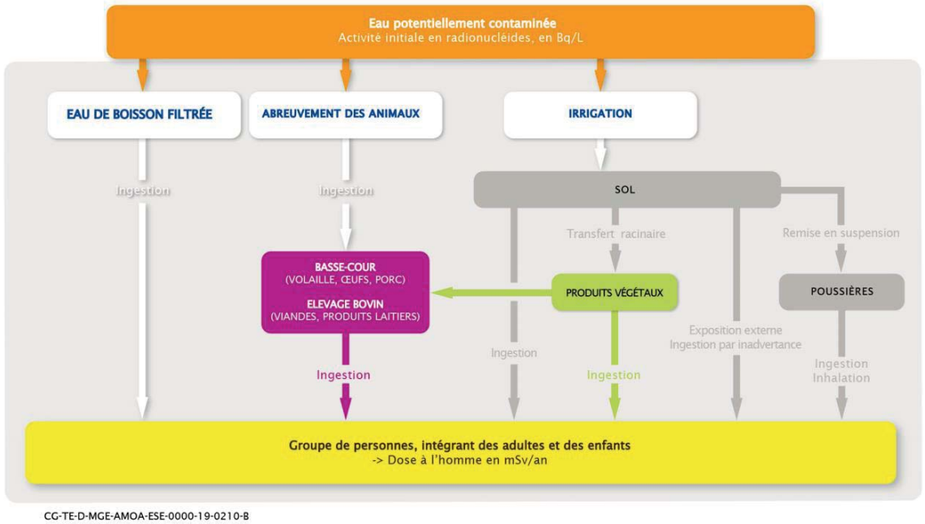


Figure 4-4 *Illustration des voies de transfert à l'homme*

L'évaluation de l'éventuelle incidence sur la santé humaine repose sur une démarche qui s'appuie sur le guide n° 1 de 2008 de l'ASN (8) et sur les pratiques internationales. Cette démarche mise en œuvre par l'Andra se décline en cinq étapes (cf. Figure 4-5) :

- choix de biosphères types à retenir pour l'évaluation

  Il s'agit de la sélection d'une ou plusieurs biosphère(s) type(s) (tempérées, froides, chaudes) à considérer pour l'évaluation. C'est à cette étape que les choix inhérents à la prise en compte des changements environnementaux (naturels ou anthropiques) sont discutés et justifiés, éventuellement sur la base de modélisations.

  Une fois la liste des biosphères types plausibles définie, l'approche consiste à retenir pour les évaluations les différentes biosphères types possibles sur la durée définie pour les évaluations en regard de leur pertinence vis-à-vis du contexte de l'évaluation et en particulier du scénario de sûreté considéré.

  Les biosphères types retenues pour l'évaluation sont à considérer individuellement sans prendre en compte leur enchaînement au cours du temps et sont à traiter de manière équiprobable.

  Lorsque le choix des biosphères types à retenir pour l'évaluation est fait, la description de ces biosphères est réalisée. Celle-ci conduit à décrire chaque composante de la biosphère type : climat, végétation, faune, sols, géomorphologie, géologie, hydrologie, hydrogéologie, et activités humaines.

- choix de la localisation des points de prélèvements en eau pour l'alimentation des groupes de référence hypothétiques (exutoires)

  Cette étape comprend l'identification des exutoires par les études et modélisations hydrogéologiques. La notion d'exutoire renvoie au point de rejet des radionucléides dans la biosphère.

  La démarche conduit à retenir le ou les exutoire(s) et leurs localisations en cohérence avec les modèles hydrogéologiques et de transport des substances radioactives. Le choix du ou des exutoire(s) alimentant les groupes de référence hypothétiques est alors effectué parmi les exutoires identifiés pour le futur d'après les modélisations hydrogéologiques.

- choix de groupes de référence hypothétiques à retenir pour l'évaluation

  Ce choix s'appuie sur une stratégie dite « *a priori* » qui consiste à considérer plusieurs groupes hypothétiques potentiellement exposés (c'est-à-dire faisant usage de l'eau pompée) avec des comportements représentatifs des habitudes et ressources de la biosphère dans son cadre régional. Il s'agit ensuite de décrire un individu représentatif de chacun des groupes sélectionnés, par sa classe d'âge, ses voies d'exposition et son comportement alimentaire.

  L'approche conduit à examiner d'une part des comportements alimentaires moyens (groupe multi-activités) et des comportements alimentaires particuliers en lien avec une activité particulière (gros mangeur de viande bovine dans le cas d'un individu éleveur de bovins ou gros mangeur de fruits et légumes dans le cas d'un villageois avec un jardin potager par exemple). Cette approche permet de couvrir différentes activités et régimes alimentaires.

  Conformément à l'approche prudente usuelle pour ce type d'études sur de longues échelles de temps, il est fait l'hypothèse que ces groupes consomment en autarcie complète les divers produits animaux et végétaux issus de leurs activités même si ce n'est pas le cas aujourd'hui pour les populations locales.

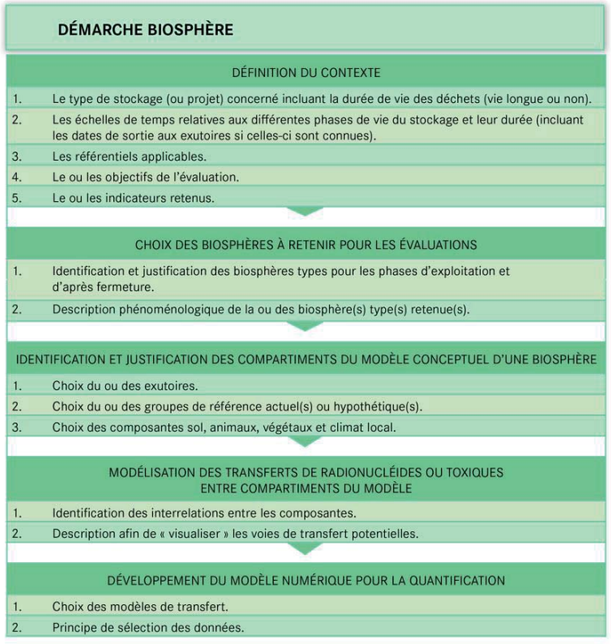


Figure 4-5 *Schéma illustrant les différentes étapes de choix et de description des biosphères*

4.2 Les risques à long terme après fermeture

4.2.1 Les risques internes au système de stockage

4.2.1.1 Des choix de conception pour limiter les perturbations physico-chimiques entre les composants du système de stockage et préserver leurs caractéristiques

La diversité des déchets conduit à rechercher une indépendance phénoménologique entre les quartiers de stockage et, au sein de chaque quartier entre certains alvéoles contenant des déchets de natures différentes :

- **sur l'aspect thermique :**
  - ✓ les colis primaires de déchets HA se caractérisent par un dégagement de chaleur qui est pris en compte dans le dimensionnement :
    - l'Andra a choisi de limiter la température et les effets thermo-hydromécaniques sur le Callovo-Oxfordien dans un domaine (i) évitant d'une part une altération irréversible des caractéristiques du système de stockage contribuant aux fonctions de sûreté, particulièrement le Callovo-Oxfordien et (ii) permettant d'autre part de maîtriser le domaine dans lequel les processus régissant l'évolution du système de stockage peuvent être représentés et modélisés de manière fiable. Ce domaine est notamment défini par une température des alvéoles toujours inférieure à 100 °C, donc de facto dans le Callovo-Oxfordien (en pratique un critère de 90 °C est retenu). Le respect de ce domaine repose sur la conjugaison de la puissance thermique des colis, elle-même liée à leur contenu radiologique et à leur durée d'entreposage préalable, et du dimensionnement de l'installation souterraine (nombre et espacement des colis par alvéole, espacement des alvéoles) ;
    - le choix d'une zone de stockage des déchets HA fortement exothermiques (déchets HA1/HA2) implantés au nord de la ZIRA, d'une zone de stockage spécifique aux déchets MA-VL, non ou faiblement exothermiques, au sud-est de la ZIRA, et d'un quartier dédié au stockage des déchets HA moyennement exothermiques (déchets HA0), entre les quartiers de déchets exothermiques HA1/HA2 et des déchets MA-VL limitent très fortement l'interaction thermique entre ces différentes zones.
- **sur l'aspect chimique :**
  - ✓ les principales perturbations chimiques induites par les déchets sont (i) la perturbation organique due à la dégradation de certains déchets MA-VL, et (ii) la perturbation saline due aux déchets MA-VL salins :
    - la limitation des perturbations chimiques entre les déchets au sein d'un alvéole et entre les alvéoles de stockage MA-VL est gérée par des dispositions de conception restrictives en matière de co-stockage (colis de déchets sans interactions chimiques significatives placés dans un même alvéole, distances minimales entre des alvéoles contenant des types de déchets différents susceptibles d'interagir entre eux).
  - ✓ d'autres perturbations sont induites par la création et l'exploitation des ouvrages souterrains et par la dégradation des matériaux de construction utilisés (aciers et béton). La principale perturbation résulte des gaz produits par corrosion anoxique et par radiolyse dans une moindre mesure :
    - il est vérifié que les performances de la couche du Callovo-Oxfordien sont maintenues malgré cette perturbation. Il s'agit de s'assurer que les gaz n'affectent pas les performances des différents composants du système de stockage, en particulier les gardes d'argilites saines autour des quartiers de stockage, ainsi que les composants ouvragés contribuant aux fonctions de sûreté[37].
- **sur l'aspect mécanique**
  - ✓ des distances minimales entre les ouvrages, en particulier entre les alvéoles adjacentes au sein d'un même quartier de stockage (par exemple environ 50 m entre alvéoles de déchets MA-VL) ;
  - ✓ ces distances permettent notamment d'éviter la combinatoire des zones endommagées de Callovo-Oxfordien au pourtour immédiat des alvéoles.

4.2.2 Les risques externes

4.2.2.1 Les dispositions pour limiter les risques liés à des évènements naturels

Comme indiqué en chapitre 2, la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle sont implantés les ouvrages souterrains est stable depuis environ 160 millions d'années, et située dans une zone, le Bassin parisien, reconnu comme très peu sismique.

Elle est localisée à une profondeur d'environ 500 mètres[38], soit bien supérieure à celle de l'érosion possible à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années (inférieure à 200 mètres) ; elle protège ainsi le stockage des phénomènes d'évolution géodynamique (tectonique, climat, érosion) sur le prochain million d'années et en limite les effets potentiels sur le stockage.

Elle préserve le stockage des aléas naturels de surface (pluie, tornade, incendies…) et plus particulièrement de l'érosion qui n'affecte, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur de terrain limitée et inférieure à 200 mètres.

Les risques liés aux évènements naturels

Compte tenu de la profondeur de couche du Callovo-Oxfordien et de son contexte géodynamique de très faible sismicité (Bassin parisien), il n'est pas identifié de scénario prenant en compte une perte des fonctions de sûreté liée aux évènements naturels externes.

Il sera vérifié dans le cadre du dossier d'autorisation de création le comportement global du stockage à un aléa sismique.

4.2.2.2 Les dispositions pour limiter les risques liés aux activités humaines

La couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle est implanté le stockage se situe à une profondeur d'environ 500 mètres. La profondeur d'implantation permet de préserver le stockage de toute activité humaine susceptible de survenir à la surface (chantiers, destruction, pillage, agressions…).

L'Andra met en œuvre des actions pour le maintien de la mémoire du stockage le plus longtemps possible, à minima 500 ans, pour éviter toute intrusion involontaire dans le stockage par la méconnaissance de sa présence :

- la protection de l'homme et l'environnement ne repose pas sur le maintien de la mémoire sur de longues échelles de temps : pour ce faire, afin de limiter les risques d'intrusions humaines, le site a été choisi en dehors de zones de ressources à caractère exceptionnel ;
- un archivage des données est mis en place dès maintenant au sein de l'Andra et déployé pendant la construction initiale et tout au long de sa durée de fonctionnement pour tracer la surveillance de l'exploitation du centre de stockage et les éventuels accidents. L'Andra travaille également à

[37] Cette évaluation dans les options de sûreté est annoncée pour le dossier de demande d'autorisation de création.
[38] Le guide n° 1 de sûreté de l'ASN de 2008 mentionne que *« l'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est a priori de l'ordre de 200 mètres »*.

développer des dispositifs pour favoriser l'archivage et la transmission intergénérationnelle des connaissances des déchets, de leur lieu de stockage, des opérations menées dans l'installation et des éventuels accidents ainsi que des résultats de la surveillance de l'environnement depuis l'établissement de son état initial. Les réexamens périodiques pendant toute la vie de l'installation permettent de vérifier sans attendre la fin du fonctionnement de l'état radiologique de l'installation. Ces éléments contribuent ainsi à bien établir l'état radiologique de l'installation une fois fermée définitivement ;

- il y a par ailleurs une responsabilité collective à maintenir la mémoire sur plusieurs siècles ou plusieurs millénaires. En croisant des disciplines aussi variées que l'archéologie des paysages, la linguistique, le vieillissement des matériaux, l'archivistique et les sciences humaines et sociales, l'Andra travaille sur plusieurs pistes associant messages, supports physiques et relais. L'objectif est de conserver et de transmettre la mémoire du site aux générations futures, afin que nos lointains descendants trouvent et comprennent les informations que nous leur aurons laissées sur le centre de stockage Cigéo.

L'Andra travaille donc à développer des dispositifs pour favoriser la transmission intergénérationnelle des connaissances des déchets et de leur lieu de stockage, considérant ces connaissances comme un patrimoine collectif et mémoriel de ce que notre civilisation a créé.

Un suivi et un contrôle institutionnel associés au maintien de la mémoire du centre de stockage Cigéo pourront néanmoins apporter une robustesse complémentaire, dont les objectifs et les dispositifs à mettre en œuvre seront précisés dans le rapport de sûreté en support de la demande d'autorisation de création :

- la période de suivi par l'exploitant (phase de surveillance), dont la durée reste à fixer comprendra certains dispositifs qui pourront être maintenus après la fermeture du centre de stockage Cigéo. Les éventuels dispositifs de suivi après fermeture ne devront pas perturber le stockage ni la couche du Callovo-Oxfordien. Plusieurs pistes sont envisageables : techniques non intrusives en surface (géophysique…), mesures dans des forages instrumentés réalisés depuis la surface jusqu'à l'Oxfordien calcaire. Le suivi s'achèvera avec le déclassement de l'installation tel que prévu à l'article L. 593-33 du code de l'environnement ;
- la période de contrôle institutionnel comprendra le maintien de servitudes d'utilité publique. Cette période de contrôle institutionnel pourra aller au-delà de la phase de surveillance ;

Enfin, un suivi et un contrôle institutionnel associés au maintien de la mémoire du centre de stockage Cigéo pourront néanmoins apporter une robustesse complémentaire, dont les objectifs et les dispositifs à mettre en œuvre seront précisés dans le rapport de sûreté en support de la demande d'autorisation de création.

Les risques liés aux activités humaines

La profondeur d'implantation et les dispositifs mis en place pour maintenir la mémoire du stockage le plus longtemps possible et à minima 500 ans, permettent de réduire fortement le risque lié à des activités humaines et de considérer uniquement l'éventualité d'une intrusion humaine involontaire en cas d'oubli de l'existence du stockage.

Des scénarios d'intrusion humaine involontaire sont étudiés et concernent des forages de grande profondeur.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté après fermeture

4.3 Les incertitudes résiduelles de connaissance

4.3.1 Les incertitudes résiduelles de connaissance des données d'entrée

4.3.1.1 Les colis primaires HA et MA-VL

a) L'inventaire radiologique

L'inventaire radiologique est une donnée d'entrée importante pour la quantification des indicateurs des scénarios retenus dans l'évaluation de sûreté après fermeture. Le socle de connaissance des familles des colis de déchets établi par l'Andra (cf. Chapitre 2) permet d'établir pour chaque famille un niveau de connaissance de ces inventaires radiologiques. Selon le niveau de connaissance, il est appliqué un facteur multiplicatif pouvant aller jusqu'à un facteur 10 pour quelques familles de déchets. Ce facteur s'applique à l'ensemble des 144 radionucléides de l'inventaire radiologique.

Pendant la phase de fonctionnement, l'arrivée des colis de déchets HA et MA-VL sur le centre de stockage et donc l'agencement des colis dans les alvéoles de stockage, peut être soumise à des aléas de livraison.

Pour s'affranchir de ces aléas d'arrivée des colis, des hypothèses de distribution de l'activité indépendantes des chroniques de livraison sont appliquées en distinguant les quartiers MA-VL et les quartiers HA.

L'inventaire radiologique retenu pour l'évaluation après fermeture

Les évaluations quantitatives de l'impact sur la santé humaine prennent en compte de manière conservative un inventaire radiologique margé.

La distribution de l'inventaire radiologique des déchets dans les ouvrages souterrains est constituée pour être indépendante des chroniques de livraison.

Cette distribution respecte le principe de séparation des quartiers HA et MA-VL ainsi que les règles de co-stockage géométrique et la compatibilité chimique entre les déchets.

b) Le comportement des colis primaires en présence d'eau

Les connaissances sur les processus et les modèles de représentation des relâchements des radionucléides sont consolidés pour l'essentiel des colis retenus dans l'inventaire de Cigéo, en particulier pour les déchets vitrifiés. Le choix des modèles de relâchement des radionucléides à retenir pour l'évaluation de sûreté repose sur un niveau de connaissance acquis pour chaque famille de déchets (cf. Figure 4-6).

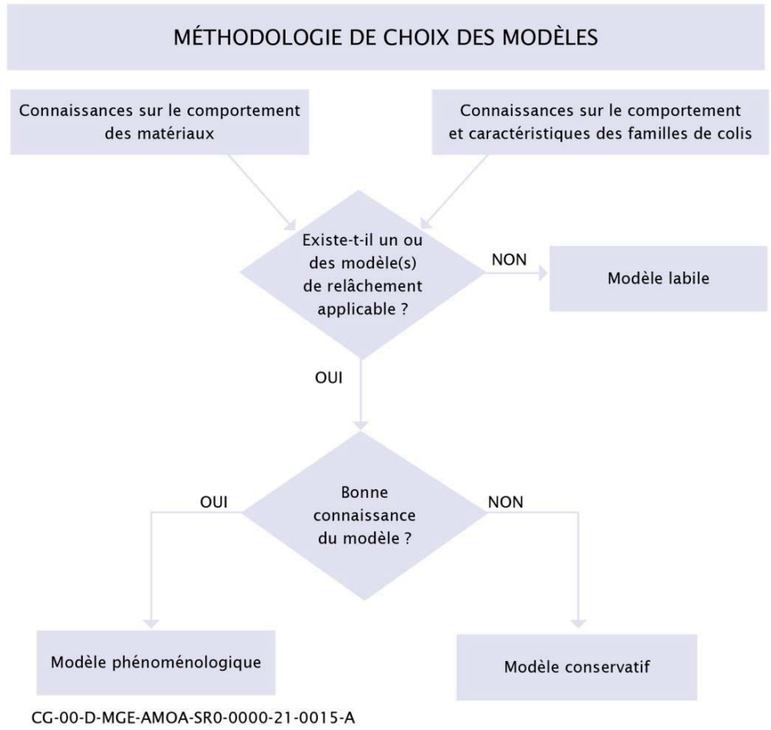


Figure 4-6 *Illustration schématique des modalités de choix des modèles de relâchement des radionucléides*

Les colis de déchets HA

Les connaissances acquises sur les colis de déchets HA permettent d'établir un domaine de comportement en présence d'eau en conditions de stockage. Ces acquis permettent ainsi de disposer d'un ensemble de données permettant de représenter le relâchement des radionucléides lorsque l'eau arrive au contact du déchet après perte d'étanchéité du conteneur de stockage. Les incertitudes résiduelles de connaissance sont prises en compte par le choix d'un modèle conservatif dans le cadre du scénario d'évolution normale.

Les colis de déchets MA-VL

Les connaissances sur les processus et les modèles de représentation des relâchements des radionucléides sont consolidées pour l'essentiel des familles de colis MA-VL retenues dans l'inventaire. Les incertitudes résiduelles de connaissance sont prises en compte par le choix d'un modèle conservatif dans le cadre du scénario d'évolution normale.

4.3.1.2 La couche du Callovo-Oxfordien

En regard des travaux de caractérisation de la couche du Callovo-Oxfordien menés depuis plus de 25 ans à différentes échelles spatiales, en lien avec son rôle central dans la sûreté à long terme, le niveau d'incertitudes résiduelles sur ses caractéristiques du Callovo-Oxfordien est limité (cf. Chapitre 2).

Le socle de connaissance est constitué notamment de jeux cohérents de données obtenus à différentes échelles et par différentes techniques et méthodologies sur la profondeur, la géométrie, l'épaisseur, les

caractéristiques d'écoulement de l'eau, de transport, de solubilité et de rétention chimique qui contribuent à retarder et limiter le transfert jusqu'à la biosphère des substances radioactives. Ce socle permet ainsi de justifier la prise en compte dans le scénario d'évolution normale d'une représentation de la couche du Callovo-Oxfordien homogène verticalement et latéralement du point de vue de ses caractéristiques hydrauliques, de transport et de rétention chimique des radionucléides (sorption et précipitation) et exempte de discontinuités.

4.3.2 Les incertitudes résiduelles « technologiques »

4.3.2.1 Les incertitudes sur les technologies mises en œuvre dans les alvéoles HA

a) Les conteneurs de stockage HA

Le choix d'aciers faiblement alliés est retenu pour leur tolérance vis-à-vis des processus de corrosion (corrosion sous contrainte par exemple) et leur bonne soudabilité.

Différentes dispositions de conception sont mises en œuvre pour prévenir le risque d'endommagement lors de la mise en place des conteneurs dans l'alvéole comme la présence de patins et la fiabilisation des moyens de manutention. Des dispositifs de surveillance de l'alvéole (conditions d'ambiance, contrôle des effluents) permettent de vérifier le comportement du conteneur dans l'alvéole.

Le conteneur de stockage HA

La solution technique retenue pour le conteneur de stockage HA est étudiée depuis plus d'une vingtaine d'année. Les essais déjà réalisés sur la qualité de fabrication des conteneurs de stockage HA, les nombreux contrôles lors des opérations de manutention des colis de stockage jusqu'à leur mise en place dans leurs alvéoles ainsi que les conditions favorables qui y seront maintenues, il n'est pas envisagé de conteneur de stockage HA défaillant dans le scénario d'évolution normale.

Dans une approche prudente, il est postulé un défaut de fabrication (ou contrôle) qui n'aurait pas été détecté dans un scénario *What-if* où l'ensemble des conteneurs de stockage des quartiers HA est supposé perdre prématurément leur étanchéité dès la fermeture du stockage.

b) Le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA

La nature du matériau qui sera mis en place à l'extrados du chemisage est en cours de définition. Par conception, ce choix sera fait pour favoriser les faibles cinétiques de corrosion, notamment en tamponnant un éventuel transitoire acide venant des argilites oxydées en champ proche de l'alvéole. Il s'agira de matériaux connus de type ciment/argile.

La capacité du matériau de remplissage à tamponner le transitoire acide a été vérifiée par expérimentations et par modélisation. Des essais au Laboratoire souterrain ont montré la faisabilité de mise en place par injection d'un matériau cimentaire. L'homogénéité globale du matériau de remplissage a été contrôlée dans certaines zones à l'extrados du chemisage : aucune hétérogénéité significative du matériau n'a été relevée.

De plus, des contrôles qualité seront mis en œuvre après mise en place du matériau de remplissage afin de vérifier l'absence d'hétérogénéités importantes de ce dernier.

Au stade des options de sûreté, un défaut du matériau de remplissage (de type hétérogénéité importante) dans chaque alvéole HA ne peut être exclu bien que cela semble peu vraisemblable. Ce type de défaut conduirait localement à ne pas tamponner le transitoire acide induit par l'oxydation des argilites en champ proche ce qui se traduirait par une vitesse de corrosion généralisée élevée rapport à celle retenue.

Elles pourraient conduire à une perte d'étanchéité prématurée du ou des conteneurs au droit de l'hétérogénéité.

Le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA

Sur la base des essais déjà réalisés et des connaissances technologiques acquises, le matériau de remplissage en extrados du chemisage HA est considéré comme efficace vis-à-vis de sa fonction de tampon du transitoire acide.

Dans une approche très majorante au stade des options de sûreté, il est postulé une imperfection de mise en place du matériau de remplissage. Celle-ci est couverte par le scénario *What-if* qui postule que tous les conteneurs de stockage de l'alvéole HA n'assurent pas leur fonction de retard d'arrivée d'eau sur les matrices de verres HA dès la fermeture.

4.3.2.2 Les incertitudes sur les technologies mises en œuvre pour la réalisation des scellements

L'Andra dispose d'un important retour d'expérience quant à la caractérisation de matériaux à base d'argile gonflante (ainsi qu'à base d'argilites excavées remaniées), qui seraient susceptibles de constituer le noyau argileux des scellements et d'atteindre les performances visées. Les études de mise en forme et de mise en place, *in situ* dans des configurations proches ou identiques à celles d'un stockage ou en surface par démonstrateur ont consolidé :

- la faisabilité de la mise en place du noyau d'argile gonflante jusqu'à un diamètre d'ouvrage de 5 à 6 mètres et avec des hors profils de dimension métrique pour ce qui concerne les galeries. Pour les puits, la verticalité est une aide à la mise en place et contribue à ce que celle-ci ne présente pas de problème particulier ;
- la faisabilité d'une gamme de solutions de mise en forme du noyau, notamment l'utilisation des pellets, pour assurer un remplissage optimal et ainsi un contact aussi parfait que possible et maîtrisé entre le noyau et le Callovo-Oxfordien après retrait du revêtement/soutènement ;
- la faisabilité de la mise en place de volumes de béton significatifs en configuration de galerie, avec notamment une bonne interface avec la roche (ou le revêtement) et des caractéristiques mécaniques conformes à celles attendues et mesurées sur échantillon ;
- la faisabilité du creusement de saignées si nécessaire.

Un contrôle qualité de la mise en place des scellements sera réalisé. Il permettra de rendre très peu vraisemblable d'éventuels non respects des spécifications sur les matériaux et leur mise en place. Par ailleurs, des démonstrateurs de scellement sont envisagés dans l'installation de stockage.

La réalisation des scellements

Sur la base du retour d'expérience, notamment des expérimentations au Laboratoire souterrain et à l'étranger et des démonstrateurs en surface, un dysfonctionnement d'un scellement lié aux opérations de réalisation est jugé très peu vraisemblable.

Selon une approche prudente, une telle situation est néanmoins postulée dans le cadre de scénarios *What-if* qui permettent de couvrir (i) une absence de gonflement du noyau argileux suite à la mise en place de matériaux autres que ceux prévus ou une évolution non anticipée, et (ii) d'éventuels défauts d'interface argile gonflante/argilites.

4.3.3 Les incertitudes résiduelles de connaissance portant sur l'évolution physico-chimique du système de stockage

a) L'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien autour des ouvrages

Les grands mécanismes qui pilotent le comportement mécanique du Callovo-Oxfordien, et des argilites en particulier, notamment lors du creusement des ouvrages souterrains sont identifiés, et les contraintes mécaniques majeures naturelles dans le Callovo-Oxfordien sont déterminées.

Ces acquis permettent d'évaluer les caractéristiques de la zone endommagée de Callovo-Oxfordien autour des ouvrages souterrains, notamment son extension relative en fonction de la dimension (e.g. diamètre) de l'ouvrage, de son orientation par rapport à la direction de la contrainte majeure naturelle horizontale, et de l'unité litho-stratigraphique du Callovo-Oxfordien dans laquelle l'ouvrage est réalisé :

- les grands mécanismes qui pilotent le comportement mécanique dans les différentes unités qui composent la couche du Callovo-Oxfordien. La connaissance acquise depuis plus de 20 ans au Laboratoire souterrain a permis d'établir un modèle conceptuel de développement de la zone endommagée autour des ouvrages en lien avec les contraintes mécaniques majeures naturelles dans la couche du Callovo-Oxfordien. La zone d'argilites endommagées mécaniquement est ainsi composée par une zone fracturée connectée (ZFC) et une zone à fracturation discrète (ZFD). La ZFC et la ZFD ne sont pas observées dans l'unité silto-carbonatée (USC) et l'unité de transition (UT) de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- l'influence des différentes techniques de creusement et de revêtement-soutènement vis-à-vis de l'endommagement mécanique de la roche en champ proche des ouvrages.

  Ces acquis permettent d'évaluer l'extension des ZFC et ZFD en fonction de la dimension (e.g. diamètre) excavée de l'ouvrage, de son orientation par rapport à la direction de la contrainte majeure naturelle horizontale et de l'unité de la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle l'ouvrage est réalisé.

  L'extension de la zone endommagée repose sur un set important et cohérent de mesures acquises au Laboratoire souterrain pour un ensemble d'ouvrages très différents (dimension, mode de creusement, mode de revêtement/soutènement, orientation par rapport aux directions des contraintes principales horizontales).

Les caractéristiques hydro-dispersives de la zone endommagée (ainsi que la rétention), notamment leur évolution dans le temps, ont été mesurées au Laboratoire souterrain. En s'appuyant sur les connaissances acquises, les processus d'auto-colmatage et de cicatrisation hydraulique sont pris en compte pour définir les caractéristiques hydro-dispersives des zones endommagées mécaniquement de la couche du Callovo-Oxfordien dans les scénarios.

L'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien au pourtour des ouvrages souterrains

Les connaissances acquises permettent d'établir une représentation de l'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien en champ proche des ouvrages souterrains dans le scénario d'évolution normale (situation de référence et situation enveloppe) :

- qui prend en compte la différence de comportement mécanique des différentes unités lithostratigraphiques de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- avec une géométrie et une proportionnalité des extensions de l'endommagement mécanique en fonction du diamètre de l'ouvrage excavé et de son orientation dans l'installation de stockage.

De manière prudente, le cas d'une évolution potentielle défavorable des argilites endommagées mécaniquement au droit des scellements pouvant conduire à une dégradation de leur performance hydraulique est envisagé dans le cadre d'un scénario d'évolution altérée (SEA) de dysfonctionnement des scellements.

b) Le transitoire thermique

Les effets du transitoire thermique (incluant les effets thermo-hydromécaniques sur la couche du Callovo-Oxfordien) sont limités par conception.

Les connaissances acquises permettent pour tous les scénarios :

- d'évaluer l'intensité et l'extension spatio-temporelle du panache thermique transitoire résultant des dispositions de conception et intégrant les caractéristiques thermiques du Callovo-Oxfordien ;
- de prendre en compte les effets de la température dans le volume de Callovo-Oxfordien affecté par le transitoire thermique après disposition de conception (paramètres de transport et rétention chimique) ;
- de prendre en compte les effets de la température dans les alvéoles HA (prise en compte de la température dans les modèles de relâchement des déchets vitrifiés, et les limites de solubilité des substances radioactives).

c) Les perturbations chimiques issues des déchets MA-VL

La perturbation saline

Les sels solubles (nitrate, sulfate, potassium, sodium) contenus dans les alvéoles de stockage de déchets MA-VL salins seront progressivement mis en solution avec l'arrivée d'eau sur les déchets. Ce phénomène est susceptible de modifier la réactivité et la migration des substances radioactives dans le Callovo-Oxfordien. Les résultats des études conduites montrent que l'influence de ce panache salin dans la couche du Callovo-Oxfordien est très limitée (uniquement sur quelques mètres environ).

Des dispositions techniques ont été définies en matière de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL, ce qui permet de limiter cette perturbation dans le Callovo-Oxfordien.

Les connaissances acquises permettent de représenter la propagation du panache salin dans le Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles qui en contiennent. Les incertitudes résiduelles de connaissance sont prises en compte dans les scénarios par un choix majorant qui conduit à retenir son extension maximale dans la couche du Callovo-Oxfordien.

La perturbation organique

Lors de leur dégradation, certains colis de déchets MA-VL contenant des composants organiques peuvent générer des espèces complexantes de substances radioactives et influencer ainsi leur migration. Des études ont été menées sur les molécules organiques ce qui a permis de caractériser le transport de certains radionucléides complexés. Les résultats montrent que l'influence de la présence de substances

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté après fermeture

organiques complexantes sur la migration des radionucléides à l'échelle du Callovo-Oxfordien est très limitée (uniquement sur quelques mètres environ).

Des dispositions techniques ont été définies en matière de co-stockage physico-chimique des déchets MA-VL ce qui permet de limiter cette perturbation dans la couche du Callovo-Oxfordien.

Les connaissances acquises permettent de représenter la propagation des perturbations organiques dans le Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles qui en contiennent. Les incertitudes résiduelles de connaissance sont prises en compte dans les scénarios par un choix majorant qui conduit à retenir son extension maximale dans la couche du Callovo-Oxfordien.

d) Les perturbations chimiques issues des composants en béton

Les bétons sont naturellement en déséquilibre chimique avec le Callovo-Oxfordien (pH basique des bétons vs pH neutre des eaux du Callovo-Oxfordien). Ils vont se dégrader chimiquement sous l'effet des eaux du Callovo-Oxfordien et corrélativement générer une perturbation dite alcaline sur le Callovo-Oxfordien.

Les acquis de connaissance appuyés par des études expérimentales et des simulations ont permis de cerner les principaux processus pilotant les interactions entre le béton et les argilites du Callovo-Oxfordien ainsi que leur extension en fonction du temps.

Ces acquis de connaissances ont permis d'établir un modèle conceptuel de dégradation chimique des bétons et de développement de la perturbation alcaline dans la couche du Callovo-Oxfordien au contact de matériaux cimentaires. Du fait des faibles flux d'eau et de la diffusion lente des solutés dans le Callovo-Oxfordien, les observations in situ et sur échantillons, les simulations numériques et les observations d'analogues naturels montrent une dégradation chimique des bétons très lente ainsi qu'une extension très limitée de la perturbation alcaline (transformations minéralogiques limitées d'ordre de quelques décimètres sur le million d'années selon l'ouvrage concerné ce qui est faible au regard de la garde de couche du Callovo-Oxfordien de plusieurs dizaines de mètre de part et d'autre du stockage).

Les connaissances acquises permettent pour tous les scénarios de prendre en compte les effets de la perturbation alcaline engendrée par la dégradation des matériaux cimentaires sur le long terme qui ne concerne qu'une très faible épaisseur de Callovo-Oxfordien au contact de ces matériaux.

e) La corrosion des éléments métalliques

Le comportement à long terme des éléments métalliques (chemisages HA, conteneurs de stockage HA, autres composants tels que les ferraillages des bétons, etc.) est dominé par leur corrosion. Les modalités de corrosion (généralisée, localisée etc.) et les cinétiques associées ont été étudiées pour différentes conditions physico-chimiques (expérimentations en laboratoires de surface et expérimentations in situ au Laboratoire souterrain) : l'ensemble des processus de corrosion est bien connu. Il ressort des acquis de connaissance que de manière générale, les mécanismes et vitesse de corrosion présentent peu d'incertitudes.

Par ailleurs, l'Andra a fixé un certain nombre d'exigences de conception notamment pour le conteneur de stockage HA afin de le protéger de certains processus de corrosion (corrosion sous contrainte, corrosion radiolytique…) ou d'en limiter les effets.

La corrosion des éléments métalliques

Des dispositifs de conception sont mis en place pour protéger le conteneur de stockage HA des processus de corrosion et qu'il remplisse son rôle de protection des déchets vitrifiés pendant la période thermique (absence d'arrivée d'eau par étanchéité).

Bien que peu vraisemblable, une corrosion plus importante à l'intérieur de la partie utile de l'alvéole HA pourrait entraîner une perte d'étanchéité prématurée du conteneur de stockage HA est considérée. Cette hypothèse, bien que peu vraisemblable, conduit à retenir :

- un scénario d'évolution altéré de défaut de conteneur de stockage HA qui considère une perte d'étanchéité dès la fermeture du stockage des conteneurs de stockage du quartier HA0 ;
- un scénario What'if qui considère la perte d'étanchéité de tous les conteneurs de stockage HA juste après la fermeture définitive de l'installation souterraine.

4.3.4 Les incertitudes résiduelles de connaissance sur l'évolution à long terme du milieu géologique environnant

a) Les formations encaissantes

La couche du Callovo-Oxfordien est entourée de formations encaissantes qui sont constituées de niveaux calcaires et de niveaux marneux (cf. Chapitre 2). Les acquis de connaissance sur ces formations et les incertitudes résiduelles associées permettent de retenir des propriétés de diffusion et de rétention dans les niveaux marneux, mais pas dans les niveaux calcaires.

La géodynamique interne du site et le couplage avec les évolutions climatiques enveloppes possibles montrent l'absence de processus d'érosion significatif sur le million d'année.

b) L'hydrogéologie

L'évolution des écoulements d'eau dans les niveaux ou zones aquifères des formations encaissantes sur le long terme (sur un million d'années) a été évaluée au moyen de simulations intégrant les cycles d'évolutions climatiques potentielles (y compris en lien avec les effets anthropiques) et les érosions en surface (incluant l'évolution géodynamique interne).

Le modèle hydrogéologique du secteur à l'actuel et sur le prochain million d'années couplé aux modèles d'évolution géodynamique retenus comme enveloppe a permis de préciser l'évolution des champs de charge dans le Dogger et dans l'Oxfordien et celle du champ de gradient de charge hydraulique vertical dans le Callovo-Oxfordien (déterminé par les charges hydrauliques du Dogger et de l'Oxfordien Carbonaté) à l'actuel et sur le prochain million d'années, en particulier à l'échelle de la zone d'implantation et de recherche approfondie. Les résultats montrent que l'hydrogéologie du secteur (Dogger et Oxfordien Carbonaté) ne présente pas d'évolution significative sur le prochain million d'années par rapport à l'actuel.

Les incertitudes résiduelles de connaissance sont prises en compte par un choix conservatif de retenir en situation enveloppe du scénario d'évolution normale des flux hydrauliques ascendants ou descendants dans le Callovo-Oxfordien résultant d'une différence de charge hydraulique maximale uniforme et constante dans le temps afin de maximiser les effets sur le transfert des radionucléides vers le toit et le mur du Callovo-Oxfordien.

Des simulations de transport des particules introduites dans les horizons perméables du Dogger et de l'Oxfordien Carbonaté au niveau de la zone d'implantation de recherche approfondie qui permettent d'évaluer les trajectoires potentielles des radionucléides à l'actuel et dans le futur ont été conduites.

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté après fermeture

Ces simulations constituent une donnée d'entrée pour définir les points de prélèvements d'eau par pompage (forages) considérés pour les évaluations quantitatives :

- les Calcaires du Dogger après un transfert latéral sous la couche du Callovo-Oxfordien, à l'est de la zone qualifiée de fracturation diffuse ;
- les Calcaires du Barrois après un transfert depuis les formations géologiques situées au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien (Oxfordien carbonaté et Kimméridgien).

c) La biosphère

Conformément au guide n° 1 de 2008 de l'ASN (8) et à la démarche présentée au chapitre 4.1.4.2c), les incertitudes résiduelles de connaissance liées aux évolutions de la biosphère sur le long terme sont prises en compte en considérant différentes biosphères représentatives des types de climat qui pourraient se produire dans le futur (y compris par effet anthropique). Leur choix repose sur des simulations qui considèrent les deux évolutions climatiques et géomorphologiques suivantes :

- l'évolution naturelle (climat non altéré par l'activité humaine) ;
- l'évolution considérant les effets anthropiques (climat altéré par les gaz à effet de serre).

Les biosphère types

Pour réaliser les évaluations quantitatives des scénarios après fermeture, trois biosphères types sont retenues :

- une biosphère de type tempéré ;
- une biosphère de type boréal ;
- une biosphère de type climat chaud subtropical humide.

Au stade du DOS, les biosphères de types « tempéré » et « chaud subtropical humide » considérées comme enveloppes sont traitées. La biosphère de type boréal sera traitée dans le cadre de l'évaluation de sûreté après fermeture pour la demande d'autorisation de création.

4.4 Les scénarios de sûreté après fermeture retenus

L'application de la démarche d'analyse présentée au chapitre 1 conduit à étudier de manière systématique, composant par composant, au regard de leur rôle vis-à-vis des fonctions de sûreté et des exigences associées et au regard des connaissances scientifiques et technologiques, l'influence des risques et incertitudes résiduelles de connaissance. L'analyse porte ainsi sur :

- la couche du Callovo-Oxfordien qui est le composant central pour la sûreté après fermeture du stockage ;
- les composants ouvragés qui jouent un rôle complémentaire au Callovo-Oxfordien :
  - ✓ les scellements des ouvrages souterrains, galeries, puits et descenderies ;
  - ✓ les composants des alvéoles HA ;
  - ✓ les composants des alvéoles MA-VL.

  Pour la couche du Callovo-Oxfordien, composant essentiel vis-à-vis de la sûreté sur le long terme après fermeture, il constitue la voie de transfert principale des substances radioactives :
- du fait du large panel de connaissances acquises depuis de nombreuses années, incluant les acquis du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, l'Andra dispose d'un ensemble de données d'entrée important et robuste à différentes échelles de la formation de la couche du

Callovo-Oxfordien. Les quelques incertitudes résiduelles identifiées dans le socle de connaissance scientifiques et technique sont intégrées en scénario d'évolution normale, notamment dans la situation enveloppe ;

- la prise en compte d'une discontinuité verticale qui n'aurait pas été reconnue et pouvant être hydrauliquement active est postulée dans le cadre d'un scénario *What-if* défini de manière conventionnelle.

  Pour les composants ouvragés, l'analyse porte en particulier sur (i) les scellements de puits, descenderies et galerie, et (ii) les colis de stockage HA :

- concernant les scellements, l'analyse conduit à :
  - ✓ considérer, dans le cadre de scénario d'évolution altérée, la présence éventuelle d'une zone de fracturation connectée au droit du noyau argileux des scellements de puits et descenderies réalisés dans le Callovo-Oxfordien du fait des incertitudes résiduelles sur le comportement différé des argilites. De plus, il a été considéré un auto-colmatage imparfait des argilites endommagées mécaniquement en champ proche ce qui provoquerait un défaut de performance hydraulique. Compte tenu des causes de dysfonctionnement identifiées, le dysfonctionnement des scellements est représenté dans un scénario de déviation de l'évolution normale par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien et en conséquence la non réalisation de la performance exigée des scellements ;
  - ✓ postuler un scénario *What-if* de dysfonctionnement de l'ensemble des noyaux argileux des scellements des liaisons surface-fond et des scellements de galeries, qui considère qu'ils ne sont pas réalisés de manière conforme aux exigences applicables à Cigéo. Cela conduit à représenter le noyau argileux des scellements avec des caractéristiques hydrauliques équivalentes à celle du remblai des galeries. Cette représentation induit une forte dégradation de la performance hydraulique des scellements donc impacte la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau ». Ce scénario vise à évaluer comment l'architecture du stockage (son caractère borgne) et le Callovo-Oxfordien apportent de la robustesse et de vérifier si la voie de migration des substances radioactives par la couche du Callovo-Oxfordien reste majoritaire par rapport à celle par le stockage.
- concernant les colis de stockage HA, l'analyse conduit à :
  - ✓ définir un scénario d'évolution altérée qui considère des incertitudes résiduelles liées à la présence d'oxygène dans l'alvéole HA entrainant une perte d'étanchéité plus rapide que prévu des conteneurs de stockage. Ce scénario est retenu pour le quartier de stockage HA0, il est en effet considéré que le quartier de stockage des colis de déchets HA1/HA2 bénéficiera du retour d'expérience ;
  - ✓ postuler un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA bien que cet événement soit considéré très peu vraisemblable. Cela conduit à considérer la perte d'étanchéité prématurée de l'ensemble des conteneurs de stockage HA. Ce scénario vise à vérifier la robustesse également du système de stockage et le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien.

4.5 Les évaluations quantitatives des scénarios de sûreté après fermeture retenus

4.5.1 Les exutoires et biosphères retenus

Au stade du DOS, les prélèvements d'eau par pompage (forages) considérés comme pouvant intervenir dans les formations géologiques sont (cf. Figure 4-7) :

- les Calcaires du Dogger après un transfert vers le mur de la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle est implanté le stockage, soit à l'est de la zone qualifiée de fracturation diffuse ;
- les Calcaires du Barrois après un transfert vers les formations situées au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien.

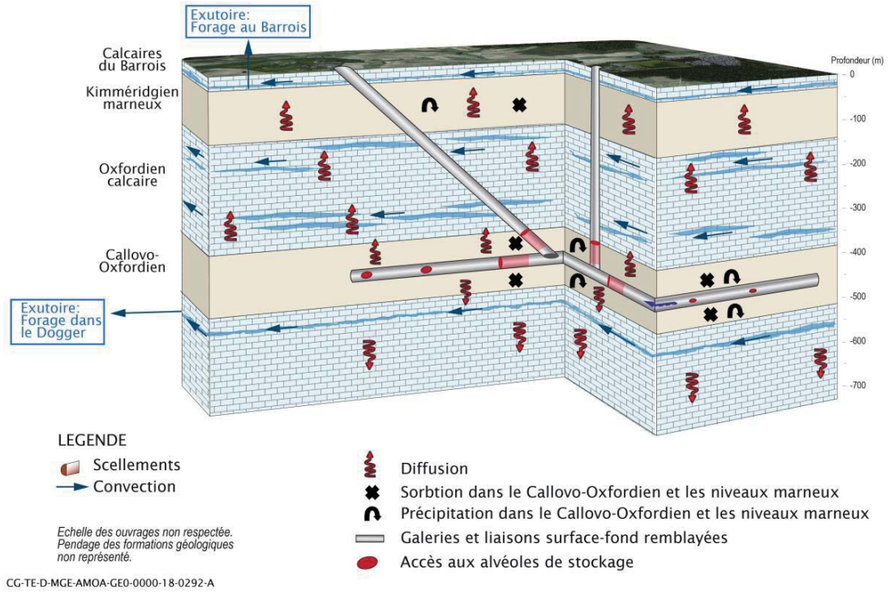


Figure 4-7 Illustration des exutoires retenus à ce stade des options de sûreté

Les biosphères retenues sont :

- une biosphère dite « tempérée » ;
- une biosphère dite « chaude de type subtropical humide ».

  Ces biosphères types permettent de tenir compte de l'influence des différents niveaux d'irrigation des cultures et des jardins potagers (les biosphères chaudes nécessitant plus d'arrosage l'été) et des différents régimes alimentaires (le régime alimentaire de biosphères chaudes comprenant plus de fruits et de légumes par exemple) en fonction des évolutions climatiques prévisibles sur ces échelles de temps.

  Pour chacune de ces biosphères types, des groupes de personnes intégrant des adultes et des enfants et tenant compte d'activités susceptibles de conduire à des voies d'exposition potentielles sont définis. Une fois le stockage fermé, il s'agit des potentialités d'usage de l'eau, à savoir :

  ✓ un groupe de personnes qui utilise le pompage dans l'eau des Calcaires du Barrois pour boire (eau de boisson), pour irriguer de grandes cultures céréalières et son jardin potager et pour abreuver les animaux (élevage bovins et animaux de basse-cour) ;

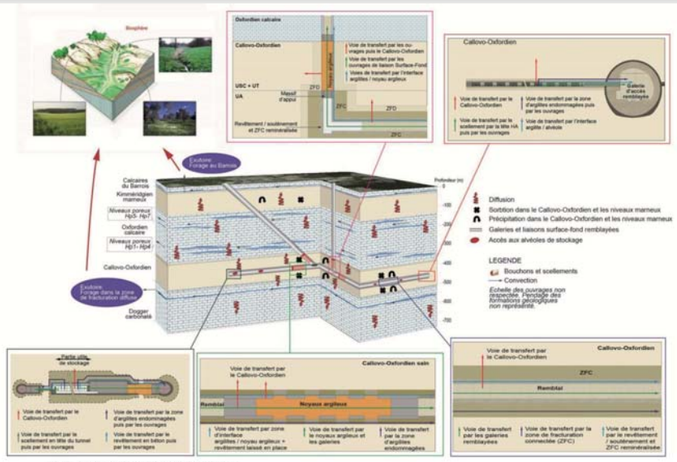
  ✓ un groupe de personnes qui utilise l'eau des Calcaires du Dogger pour boire (eau de boisson) et abreuver les animaux et pour irriguer les jardins potagers (du fait de la faible productivité des Calcaires du Dogger, l'irrigation de cultures céréalières n'est pas envisagée).

  Conformément à l'approche prudente usuelle pour ce type d'études sur de longues échelles de temps, il est fait l'hypothèse que ces groupes consomment en autarcie complète les divers produits animaux et végétaux issus de leurs activités même si ce n'est pas le cas aujourd'hui pour les populations locales.

4.5.2 Le scénario d'évolution normale

L'évolution normale du stockage dans le temps considère (cf. Figure 4-8) :

- les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien, les dispositions d'architecture du stockage retenues, ainsi que les composants ouvragés que sont les colis de stockage et les scellements qui évoluent comme prévu et ont les performances qui leur sont attribuées. Elle considère cette évolution sur une période de l'ordre du million d'années ;
- l'évaluation des performances et des incidences résiduelles sur l'homme et l'environnement se fonde sur la connaissance détaillée des phénomènes physico-chimiques qui interviennent sur le long terme dans le stockage, la couche du Callovo-Oxfordien et le milieu géologique en général, et *In fine* des voies de transfert des radionucléides jusqu'aux exutoires en supposant que les humains du futur viendraient notamment utiliser les eaux des aquifères (Dogger et Barrois) pour leurs activités.



CG-TE-D-MGE-AMOA-GE0-0000-21-0018-A

Figure 4-8 *Représentation schématique des voies de transfert depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère*

Au stade du DOS, en scénario d'évolution normale, les évaluations de performance à l'aide d'indicateurs appropriés et l'évaluation des incidences en termes d'exposition humaine montrent que :

- l'essentiel des 144 radionucléides contenus dans les colis de stockage de déchets HA et MA-VL reste dans les alvéoles de stockage ou dans le Callovo-Oxfordien au pourtour proche du stockage. Seuls les quelques radionucléides mobiles à vie longue peuvent migrer hors du stockage dans le Callovo-Oxfordien ;
- les substances radioactives qui migrent le font en majorité par la couche du Callovo-Oxfordien par rapport aux ouvrages souterrains. À titre illustratif, pour les radionucléides mobiles à vie longue, comme l'Iode 129 (cf. Figure 4-9), à un million d'années :
  - ✓ environ 80 % de leur inventaire initial reste dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, les 20 % restant ont atteint les extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien de manière symétrique du fait d'une migration par diffusion (11 % vers l'Oxfordien et 11 % vers le Dogger) ;
  - ✓ la voie de transfert par les liaisons surface/fond est très faible avec moins de 0,1 % de l'inventaire initial transitant par ces ouvrages ;
  - ✓ après transfert dans les formations sus et sous-jacentes de la couche du Callovo-Oxfordien, les quantités arrivant aux exutoires du Dogger et du Barrois représentent respectivement 9 % et moins d'1 millième de % de l'inventaire initial.

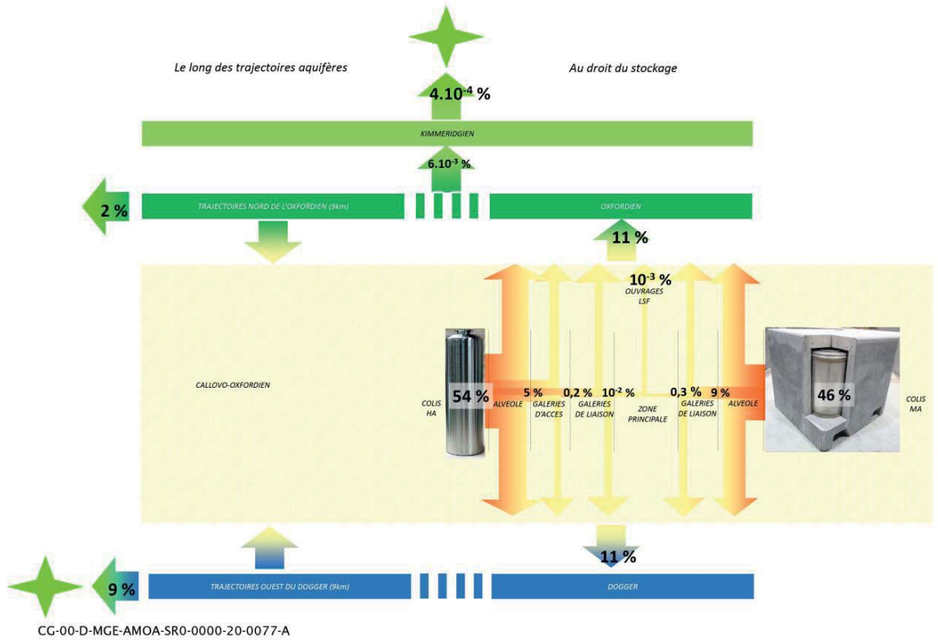


Figure 4-9 *Illustration de la répartition de l'inventaire en Iode 129 à 1 million d'années en scénario d'évolution normale (situation de référence)*

- les transferts sont à diffusion dominante. Les radionucléides, qui parviennent à sortir du Callovo-Oxfordien reflètent un temps de transfert très lent au-delà de 100 000 ans dans la situation la plus conservative (situation enveloppe) et bien au-delà de 450 000 ans pour la situation de référence. Ce sont les radionucléides mobiles à vie longue qui parviennent aux extrémités du Callovo-Oxfordien (Iode 129, Chlore 36, et le Sélénium 79) ;

- pour les deux situations du scénario d'évolution normale, l'activité qui parvient au toit et au mur de la couche du Callovo-Oxfordien est à un niveau limité du fait des caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien en particulier de son épaisseur importante et sa propriété de faible diffusion ;
- les incidences résiduelles en termes d'exposition humaine sont dominées par l'Iode 129, le Chlore 36, et le Sélénium 79, radionucléides mobiles et à vie longue. Au stade des options de sûreté, l'exposition humaine maximale en termes de dose annuelle totale est d'environ 0,02 mSv/an et inférieure à la contrainte de dose de 0,25 mSv/an[39]. Pour la situation de référence, qui reflète des hypothèses moins conservatives, l'exposition humaine en termes de dose est inférieure à 0,001 millisievert par an.

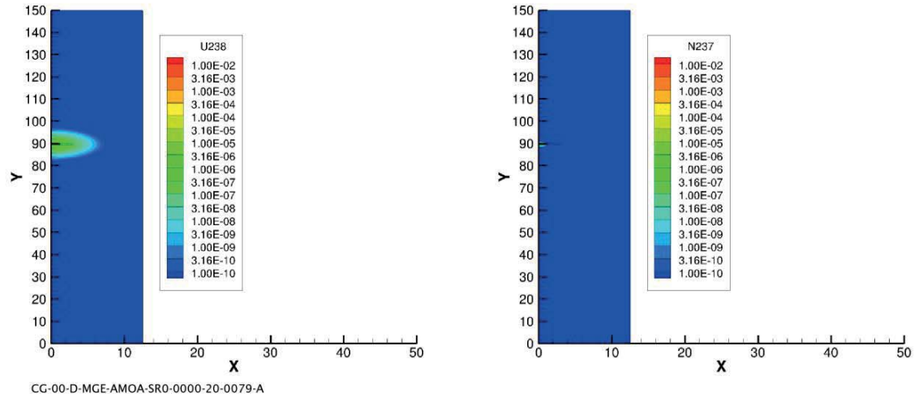
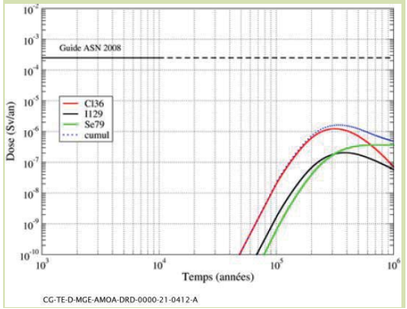
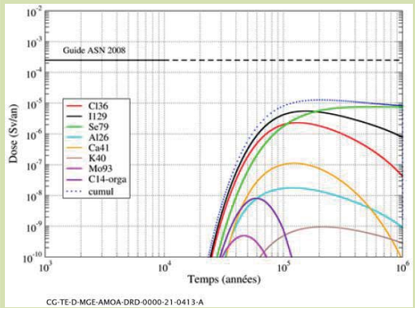
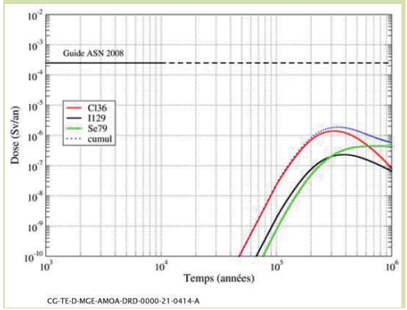
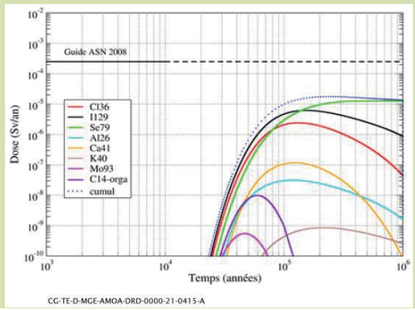


Figure 4-10 *Illustration des panaches de concentration de l'uranium 238 et du neptunium 237 (en mole/m³ d'eau) dans le Callovo-Oxfordien autour d'un alvéole de déchets HA à 1 million d'années : scénario d'évolution normale*

[39] Fixée dans le guide n° 1 de l'ASN-de 2008 (8).Fixée dans le guide n° 1 de l'ASN-de 2008 (8)

Tableau 4-1 *Scénario d'évolution normale : historique des doses aux exutoires pour les biosphères tempérée et chaude pour deux implantations du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien*

	Pompage au Barrois (150 L.min^{-1}) **« Stockage haut » implanté avec une garde supérieure de 50 m**	Pompage au Dogger (100 L.min^{-1}) **« Stockage bas » implanté avec une garde inférieure de 50 m**
Biosphère tempérée		
Biosphère chaude		

L'évaluation du scénario d'évolution normale

L'évaluation du scénario d'évolution normale conforte les performances des composants naturel et ouvragés du système de stockage après fermeture et à long terme ainsi que les faibles incidences en termes d'exposition humaine y compris pour la situation enveloppe définie par les exigences applicables et des hypothèses et données conservatives.

Elle confirme que les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et les dispositions de conception du centre de stockage Cigéo permettent d'atténuer la migration de la majorité des radionucléides vers la surface. Seuls l'Iode 129, le Chlore 36, et le Sélénium 79, radionucléides mobiles et à vie longue, parviennent aux exutoires.

Au stade des options de sûreté, l'exposition humaine maximale en termes de dose annuelle totale est d'environ 0,02 mSv/an et inférieure à la contrainte de dose de 0,25 mSv/an fixée dans le guide n° 1 de l'ASN de 2008 (8).

4.5.3 Les scénarios liés à des évolutions du stockage qui aurait dévié de son évolution normale

L'évaluation des incidences considère également des déviations de l'évolution normale du stockage notamment dues à une défaillance postulée des composants ouvragés que sont en particulier les colis de stockage HA et les scellements ou à une intrusion humaine involontaire dans le site de stockage en cas d'oubli de l'existence du stockage. Pour chaque défaillance considérée, sont définis des scénarios qui permettent d'évaluer :

- les effets sur les voies de migration potentielles des radionucléides jusqu'aux exutoires ;
- les effets sur le relâchement des radionucléides et leur migration jusqu'aux exutoires ;
- l'incidence *In fine* en termes d'exposition humaine.

4.5.3.1 Scénarios liés aux défaillances des scellements

La défaillance des scellements résulte d'une mauvaise interface hydraulique des scellements avec la couche du Callovo-Oxfordien ou une performance hydraulique du scellement qui ne serait pas celle que l'on attend.

Les scénarios évalués et illustrés sur la figure 4-11 sont :

- un SEA de dysfonctionnement des scellements de puits et de descenderie par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ;
- un SEA de dysfonctionnement des scellements des ouvrages souterrains (galerie) par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ;
- un SEA de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements par l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ;
- un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements de puits et descenderie qui postule un cumul de défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ;
- un scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements de galerie qui postule un cumul de défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien ;
- un scénario *What-if* de dysfonctionnement de l'ensemble des scellements qui postule un cumul de défaillance du noyau argileux et de l'interface entre le noyau argileux et le Callovo-Oxfordien.

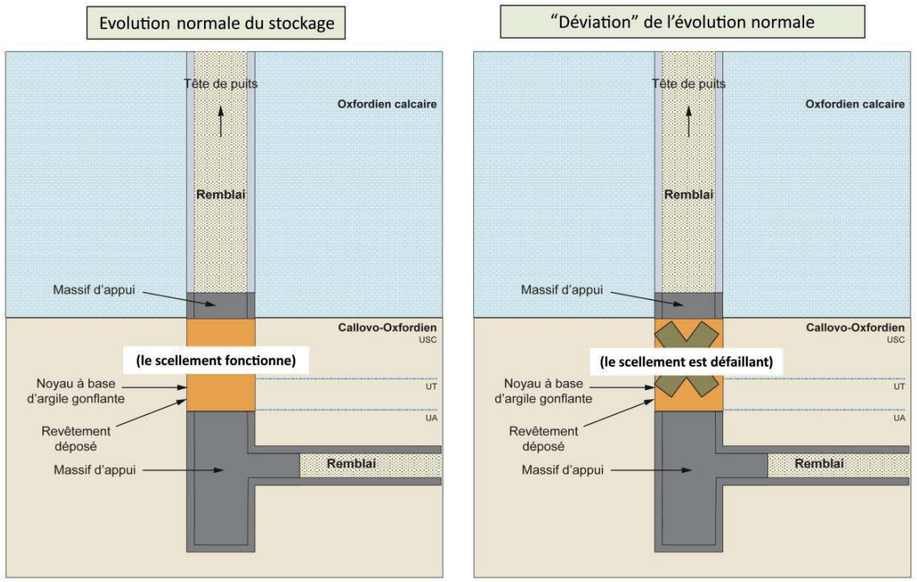


Figure 4-11 *Illustration montrant la différence entre l'évolution normale et une situation possible de défaillance de scellement pouvant induire une « déviation » de l'évolution normale*

L'effet de ces déviations sur les écoulements d'eau dans les ouvrages du stockage reste limité en raison de la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien et de l'architecture de l'installation souterraine, notamment sa borgnitude et le groupement de la base des liaisons surface-fond. Ainsi, au stade des options de sûreté :

- la couche du Callovo-Oxfordien est la voie de migration dominante des radionucléides ;
- l'essentiel des radionucléides reste dans le stockage ou dans le Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage (cf. Figure 4-12) ;
- l'incidence d'un dysfonctionnement de scellement entraine une augmentation du transfert des radionucléides par la voie ouvrage et une augmentation de la vitesse de transfert, mais de manière limitée et sans conséquences significative en termes d'incidence :
  - ✓ pour les SEA de dysfonctionnement des scellements par l'interface, le transfert par les liaisons surface/fond de l'inventaire initial est plus important par rapport au scénario d'évolution normale, mais il reste tout de même faible de l'ordre de 1 % ;
  - ✓ l'augmentation du transfert des radionucléides par la voie ouvrage et l'accroissement de la vitesse de transfert sont plus fortes dans la situation où il est postulé que tous les scellements sont défaillants (scénario *What-if*). Dans le cas le plus pénalisant, la part de l'inventaire qui parvient à sortir du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrage est légèrement supérieur à celui de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien et ce pendant environ 300 000 ans. Toutefois, l'exposition humaine maximale en termes de dose annuelle est de l'ordre de 0,002 millisievert par an, cette valeur étant similaire à celle du SEN au même exutoire de pompage dans le Barrois.
- le dysfonctionnement des scellements a peu d'incidence sur la voie de transfert vers le Dogger, la dose annuelle est similaire à celle du scenario d'évolution normale ;
- les radionucléides susceptibles d'atteindre le toit de la couche du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrage sont les mêmes que pour le scénario d'évolution normale : ce sont les anions mobiles et à vie longue, l'Iode 129, le Chlore 36, et le Sélénium 79 ;

- le transfert des radionucléides par la voie ouvrage est limité par la redondance de l'un ou l'autre des scellements (« scellement surface-fond » ou scellement « fond ») ;
- la robustesse du stockage est assurée par le caractère borgne des quartiers et de l'architecture du stockage et des propriétés hydrauliques favorables du Callovo-Oxfordien (e.g. faibles flux d'eau) face à une défaillance de tous les scellements.

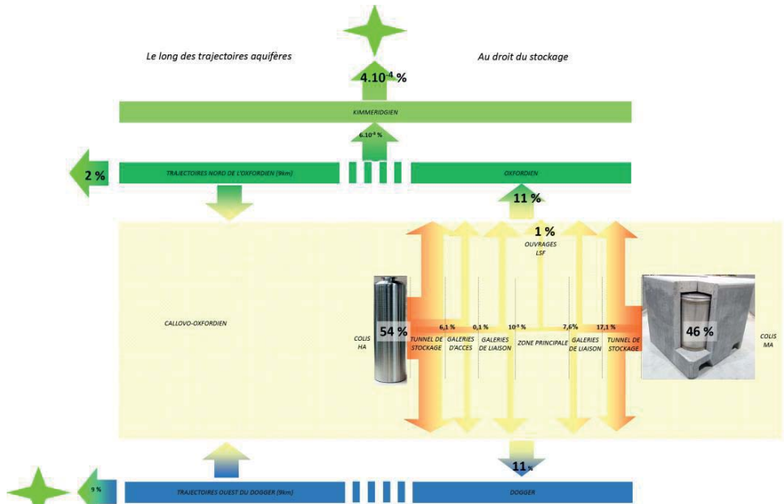


Figure 4-12 *Illustration de la répartition de l'inventaire initial en Iode 129 à 1 million d'années en scénario de dysfonctionnement de tous les scellements*

Ces situations de dysfonctionnement important qui permettent de caractériser et de quantifier plus précisément le rôle de ces scellements. Ainsi, tant pour les scénarios SEA que pour les scénarios *What-if* , cette limitation des flux d'eau, et de ce fait la limitation des flux de radionucléides (mobiles) sortant par la voie de transfert « ouvrages » s'observe plus particulièrement en situation enveloppe. Dans cette situation enveloppe, la performance hydraulique du Callovo-Oxfordien est choisie inférieure d'un facteur 25 à celle de la situation de référence, ce qui mobilise plus de flux d'eau au sein du stockage. Par ailleurs, pour ces configurations et par rapport au scénario de défaillance de tous les scellements, le rôle apporté par les scellements de fond est (a) de réduire jusqu'à un ordre de grandeur les débits maxima de radionucléides sortant par la voie de transfert « ouvrages » et (b) de favoriser la dominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien.

Les scénarios de dysfonctionnement de scellements

En cas de dysfonctionnement des scellements, la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie prépondérante de migration des substances radioactives.

Dans le cas le plus pénalisant postulant un dysfonctionnement de tous les scellements, l'impact de la santé humaine maximale en termes de dose annuelle reste similaire à celle du scénario d'évolution normale et inférieure aux effets déterministes.

Les radionucléides susceptibles d'atteindre le toit de la couche du Callovo-Oxfordien par la voie ouvrages sont comme pour le scénario d'évolution normale, les anions mobiles et à vie longue, l'Iode 129, le Chlore 36, et le Sélénium 79.

Les incidences en termes d'exposition humaine liées à de potentiels dysfonctionnements de scellements sont similaires à celles du scénario d'évolution normale.

Les résultats montrent la robustesse du stockage notamment l'importance du caractère borgne des quartiers de stockage et des propriétés hydrauliques favorables du Callovo-Oxfordien face à une défaillance de tous les scellements

4.5.3.2 Scénarios liés aux défaillances des conteneurs de stockage

Les scénarios évalués sont :

- la défaillance de tous les conteneurs de stockage du quartier pilote HA ;
- la défaillance de tous les conteneurs de stockage HA. Ce scénario *What-if* postulant le dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA, diffère du précédent par le nombre de conteneurs impactés.

La défaillance de conteneurs de stockage HA se traduit par un relâchement prématuré des radionucléides et à un niveau supérieur à celui de l'évolution normale. Les caractéristiques favorables du stockage ne sont pas impactées, ni celles des scellements des galeries et des descenderies et puits (cf. Figure 4-13).

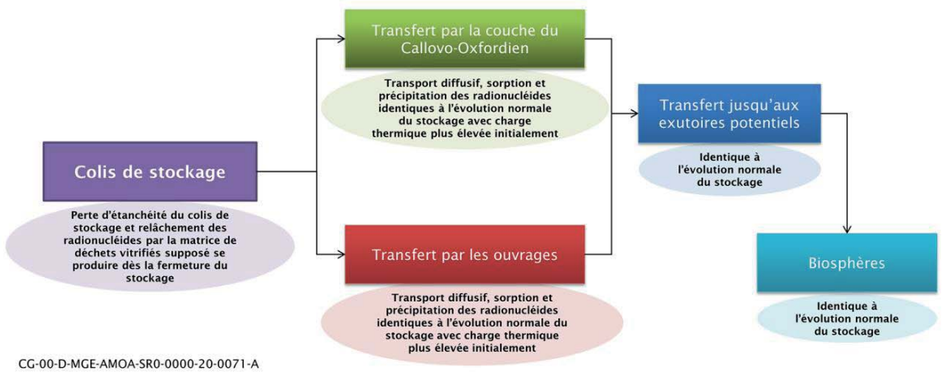


Figure 4-13 *Illustration schématique du scénario d'évolution altérée défaut de conteneur de stockage HA*

L'effet de ces déviations sur la migration des substances radioactives reste limité en raison des performances de la couche du Callovo-Oxfordien et des scellements. Ainsi, au stade des options de sûreté, les incidences liées à la défaillance de conteneurs de stockage HA sont les suivantes :

- en raison du faible inventaire en radionucléides mobiles dans les colis de déchets HA0, l'effet de la défaillance des seuls conteneurs de stockage du quartier pilote HA n'a aucune influence sur les performances du système de stockage ;
- en cas de dysfonctionnement postulé de tous les conteneurs de stockage HA, la date d'occurrence des débits molaires aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien sont avancées de quelques milliers d'années en raison d'un relâchement plus rapide des radionucléides ;
- la voie de transfert principale reste la couche du Callovo-Oxfordien. Cette prédominance s'explique par l'absence de drains hydrauliques dans les galeries. Les résultats sont identiques à ceux du scénario d'évolution normale du point de vue hydraulique ;
- les débits molaires des radionucléides mobiles entrant dans les galeries sont très légèrement augmentés par rapport à ceux du scénario d'évolution normale en raison de l'effet de la température. Le transfert lent et limité par diffusion dans les galeries permet à ces radionucléides qui migrent potentiellement par la voie ouvrage de diffuser ensuite dans la couche du Callovo-Oxfordien, ce qui réduit les débits molaires des radionucléides mobiles sortant des ouvrages.

Les scénarios liés aux défaillances des conteneurs de stockage HA

La perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA entraine un relâchement prématuré des radionucléides qui se traduit par une date légèrement avancée d'occurrence des radionucléides aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien.

La quantité de radionucléides mobiles à vie longue arrivant aux exutoires du Dogger et du Barrois sur le prochain million d'années reste du même ordre de grandeur que celle du scénario d'évolution normale ce qui conforte la robustesse du système de stockage même en cas de défaillance postulée de tous les conteneurs de stockage HA.

Les incidences en termes d'exposition humaine liées à de défaillances des conteneurs de stockage HA sont similaires à celles du scénario d'évolution normale.

4.5.4 Les scénarios d'intrusion humaine involontaire dans la zone d'implantation des ouvrages souterrains, en cas d'oubli de l'existence du stockage

Bien que des dispositions pour maintenir la mémoire de l'existence du stockage soient prises, en regard de l'échelle de temps considérée du million d'années, l'oubli potentiel de l'existence du stockage est envisagée 500 ans après sa fermeture définitive (cf. Guide n° 1 de l'ASN de 2008 (8)).

L'évaluation des incidences liées à cet oubli à long terme considère alors des activités humaines menées depuis la surface qui interfèrent avec l'installation souterraine. Les conséquences peuvent être de créer une nouvelle voie de migration des radionucléides au travers de la couche du Callovo-Oxfordien vers les exutoires du Dogger et du Barrois.

En cas d'oubli de l'existence du stockage, la profondeur de stockage permet d'isoler les déchets, d'activités humaines en surface ou faible profondeur de type chantier routier ou construction de résidence (cf. Guide n° 1 de l'ASN de 2008 (8)).

Les intrusions humaines involontaires postulées sont donc des forages de grande profondeur dans les différentes formations géologiques au droit du stockage, réalisés depuis la surface, atteignant ou dépassant sa profondeur, et avec des objectifs sans lien avec son existence. Ils correspondent par exemple à des forages de reconnaissance géologique.

Pour évaluer les incidences, il est postulé que :

- les technologies actuelles de creusement et d'équipement des forages sont transposées dans le futur ;
- les forages sont abandonnés, non scellés et perdurent dans cet état sans prise en considération de leur probable fermeture avec le temps ;
- les forages sont suffisamment proches des alvéoles de stockage ou des galeries pour être en communication hydraulique avec eux ;
- les forages constituent une voie de migration potentielle des radionucléides au travers des gardes verticales de la couche du Callovo-Oxfordien.

Les différents types de forages envisagés sont illustrés sur la figure 4-14 ci-après.

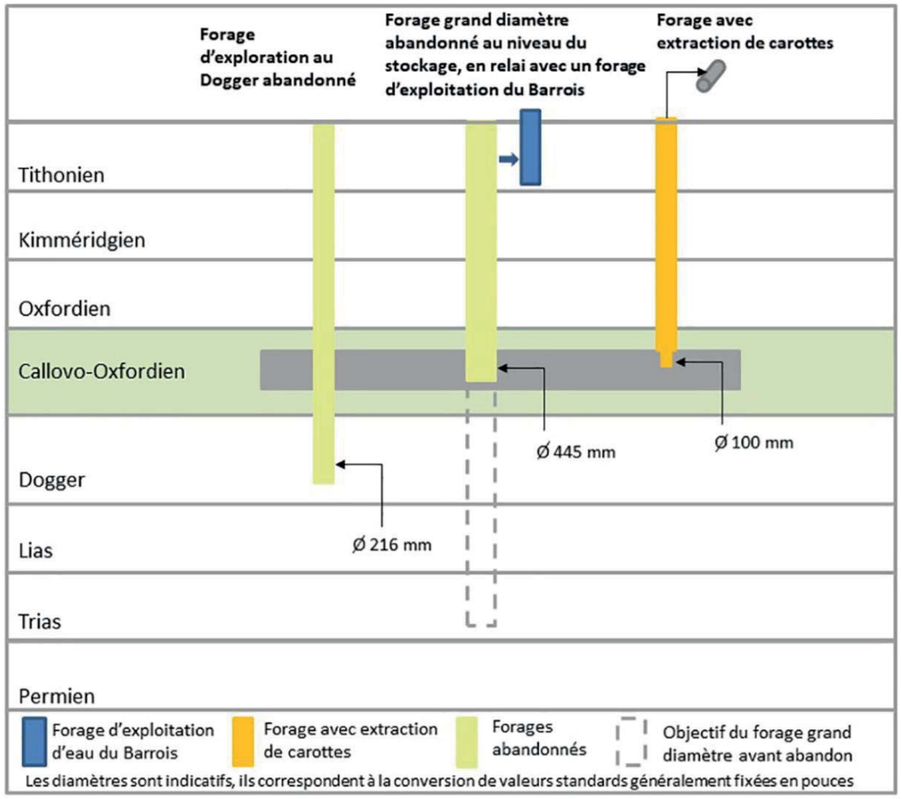


Figure 4-14 *Illustration des typologies de forages associés aux intrusions humaines involontaires au stade des options de sûreté*

Au stade des options de sûreté, l'évaluation des incidences d'un forage exploratoire abandonné traversant la couche du Callovo-Oxfordien et potentiellement un alvéole MA-VL ou à proximité d'un alvéole HA montre qu'une fraction des radionucléides relâchés par les colis de déchets peut être captée par ce forage. L'effet du forage reste néanmoins limité à son voisinage immédiat, du fait notamment de

la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien qui contrôle les débits d'eau susceptibles de circuler depuis le stockage :

- l'intrusion par forage induit une influence hydraulique dans le stockage mais elle reste limitée à quelques alvéoles adjacentes dans le cas le plus pénalisant. La présence du forage ne remet pas en cause le fonctionnement global du système de stockage et notamment le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les radionucléides concernés sont le Carbone 14 (supposé entièrement mobilisable de manière conservative), l'Iode 129, le Chlore 36 (anions mobiles) et l'Argent 108 m (sur les temps courts uniquement) ;
- dans le cas d'un forage postulé abandonné à la profondeur du stockage et supposé être en relai dans la formation aquifère superficielle des Calcaires du Barrois, l'incidence peut atteindre quelques dizaines de millisievert par an (dans le cas le plus pénalisant qui correspond à un forage postulé de grand diamètre abandonné au niveau du stockage dans un alvéole de stockage MA-VL. Cet impact reste acceptable en regard notamment de l'échelle de temps considérée et des hypothèses conservatives retenues pour définir ce scénario. Les temps d'occurrence de ces doses annuelles maximales sont de quelques dizaines d'années après l'occurrence du forage pour les radionucléides mobiles ou présentant une faible rétention dans le Callovo-Oxfordien et de quelques dizaines de milliers d'années pour les éléments avec forte rétention comme les actinides ;
- un forage tel que celui postulé abandonné au Dogger et traversant le stockage présente un impact inférieur à 0,001 mSv/an ;
- parmi les forages envisagés, conformément au guide de sûreté n° 1 de l'ASN de 2008 (8), l'incidence d'un forage « traversant le stockage avec extraction de carottes » est aussi évaluée en considérant l'exploitation de carottes constituées de déchets de moyenne activité à vie longue ou de haute activité. L'incidence exprimée en termes de dose d'exposition externe pour un foreur dans le cas d'un forage interceptant les colis les plus irradiants est de l'ordre de quelques dizaines de millisievert sur une dizaine de minutes d'exposition.

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire

Les intrusions humaines involontaires postulées sont des forages de grande profondeur dans les différentes formations géologiques au droit du stockage, réalisés depuis la surface postulant l'oubli potentiel de l'existence du stockage envisagée à 500 ans après sa fermeture définitive.

L'effet des différentes situations d'intrusion postulées ne remet pas en cause le fonctionnement du stockage et le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien.

Dans le cas le plus pénalisant postulant, de manière conservative, qu'un forage abandonné au niveau du stockage et que les substances radioactives sortant de la couche du Callovo-Oxfordien par ce forage abandonné sont intégralement et immédiatement transférées vers le forage en exploitation de la formation aquifère superficielle des Calcaires du Barrois, l'incidence sur la santé humaine peut atteindre quelques dizaines de millisievert par an.

4.6 Les composants importants pour la protection à long terme

4.6.1.1 La couche du Callovo-Oxfordien - le pilier de la sûreté après fermeture du système de stockage

La couche du Callovo-Oxfordien est le pilier de la sûreté après fermeture du système de stockage à plusieurs titres :

a) La couche du Callovo-Oxfordien permet de placer les colis de déchets à l'abri des aléas naturels externes et des activités humaines banales en les éloignant de la surface.

Les travaux de reconnaissance depuis la surface et dans le Laboratoire souterrain sur le milieu géologique d'implantation de Cigéo, en particulier la couche du Callovo-Oxfordien ont permis de déterminer ses caractéristiques intrinsèques et de vérifier qu'elles sont favorables à un stockage géologique de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue. La couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle sont implantés les ouvrages souterrains de stockage répond ainsi aux critères techniques de site du guide n° 1 de l'ASN de 2008 (8).

La profondeur bien en deçà de 200 m de la couche du Callovo-Oxfordien et donc des ouvrages souterrains, le caractère « asismique » du Bassin parisien et l'évolution géodynamique interne limitée et homogène au niveau du site d'implantation de Cigéo protègent le système de stockage des phénomènes d'érosion sur le million d'années, de l'effet d'un séisme, ou d'une intrusion humaine involontaire « banale ».

b) Les caractéristiques intrinsèques de la couche du Callovo-Oxfordien permettent de confiner dans le stockage ou en champ proche les substances radioactives contenus dans les colis de déchets radioactifs.

De par sa très faible perméabilité et les faibles gradients hydrauliques, la couche du Callovo-Oxfordien limite les circulations d'eau vecteur potentiel de migration des substances radioactives potentiellement relâchées par les colis de déchets.

Les caractéristiques géométriques et physico-chimiques de la couche (épaisseur importante, faible perméabilité, chimie de l'eau réductrice, capacité de rétention élevée…) sont favorables :

- à un relâchement limité des substances radioactives des déchets HA vitrifiés ;
- au bon comportement du conteneur de stockage HA dans le temps ;
- au maintien de la plupart des substances radioactives relâchées par les colis de déchets dans les ouvrages souterrains ou en champ proche du stockage ;
- au transfert lent par diffusion et privilégié de ces substances par la couche du Callovo-Oxfordien démontrant ainsi son rôle central.

Ainsi, l'essentiel des radionucléides restent confinés dans le stockage ou en champ proche ; seuls quelques radionucléides à vie longue non sorbés et solubles, comme le Chlore 36, migrent au travers du Callovo-Oxfordien, mais de manière retardée et atténuée.

À titre illustratif, sur 144 radionucléides contenus dans les colis de déchets HA et MA-VL, en scénario d'évolution normale, seuls l'Iode 129, le Chlore 36, et le Sélénium 79, parviennent à sortir du Callovo-Oxfordien à des niveaux très faibles et à des dates d'occurrence des maximas de flux très tardives (bien au-delà de 100 000 ans). L'impact résiduel en termes de dose annuelle sur la base d'hypothèses enveloppes est ainsi inférieur à la contrainte de dose de 0,25 mSv/an, valeur fixée par le guide n° 1 de ASN de 2008 (8).

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté après fermeture

4.6.1.2 Les dispositions d'architecture et des composants ouvragés jouant un rôle complémentaire à la couche du Callovo-Oxfordien en après fermeture

Si la couche du Callovo-Oxfordien joue un rôle central dans la sûreté après fermeture et à long terme, les dispositions de conception et des composants ouvragés jouent des rôles complémentaires, suivant trois axes :

- tirer parti des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- préserver ses caractéristiques favorables ;
- mobiliser ses caractéristiques favorables après le relâchement de radionucléides dans des conditions physico-chimiques maîtrisées et de manière lente dans le temps (cas des colis de déchets HA).

Ces dispositions visent *In fine* à favoriser la durabilité des colis de déchets et à privilégier la voie de transfert par la couche du Callovo-Oxfordien des radionucléides potentiellement relâchés par ces colis de déchets.

a) Le caractère borgne de l'architecture, de manière globale et au niveau des quartiers de déchets radioactifs

Cette disposition limite les flux d'eau dans le stockage en mobilisant les faibles flux d'eau dans le Callovo-Oxfordien, notamment en cas de défaillance de tous les ouvrages de fermeture.

Cela conduit à (i) favoriser une dégradation faible et lente des colis de déchets, (ii) privilégier pour les radionucléides la voie de transfert (lente) par le Callovo-Oxfordien, et (iii) limiter le transfert de radionucléides relâchés via les ouvrages de stockage jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien par les ouvrages de liaison surface-fond.

Ainsi, en cas de défaillance de tous les scellements, les radionucléides susceptibles d'atteindre le toit et le mur du Callovo-Oxfordien sont en nombre limité (Iode 129, Chlore 36, Sélénium 79, Aluminium 26, Potassium 40, Calcium 41 et Carbone 14 organique) et à des flux maxima faibles de sorte que leurs impacts résiduels en termes de dose sont similaires à ceux en scénario d'évolution normale (cas enveloppe).

b) La structure générale planaire du stockage et les dimensions verticales des ouvrages de stockage aussi limitées que nécessaire et raisonnable

Ces dispositions préservent des épaisseurs de la couche du Callovo-Oxfordien importantes entre le stockage et les formations encaissantes (Oxfordien calcaire et Dogger), favorables au retard et à la limitation du transfert des substances radioactives.

c) Le regroupement des puits et de la base des descenderies dans une même zone d'emprise restreinte

Cette disposition permet de limiter les « moteurs hydrauliques » entre les ouvrages de liaison surface-fond depuis l'Oxfordien calcaire, qui seraient de nature à augmenter les circulations d'eau au sein du stockage[40] .

Les (très) faibles gradients hydrauliques verticaux dans le Callovo-Oxfordien où sont implantés les puits contribuent à limiter les éventuelles circulations d'eau au sein du stockage entre ces ouvrages.

Dans ce contexte général, la localisation des quartiers HA1/HA2 globalement en aval hydraulique des puits et de la base des descenderies par rapport au sens des écoulements dans l'Oxfordien calcaire contribuent aussi à limiter les écoulements d'eau et donc la migration de substances radioactives, depuis ces quartiers vers les puits et les descenderies.

[40] Circulation préférentielle entre les ouvrages de liaison surface-fond

d) Les longueurs significatives des alvéoles de stockage (pluri décamétrique pour les alvéoles HA et de plusieurs centaines de mètres pour les alvéoles MA-VL)

Cette disposition favorise le transfert privilégié des substances radioactives depuis les alvéoles de stockage vers le Callovo-Oxfordien.

Pour les substances radioactives qui sortiraient néanmoins des alvéoles de stockage vers les galeries, plus particulièrement en cas de scénario de dysfonctionnement des scellements, les longueurs des quartiers de stockage et des galeries favorisent aussi ce transfert privilégié vers le Callovo-Oxfordien et contribuent ainsi à limiter les flux des substances radioactives qui arriveraient au niveau des ouvrages de liaison surface-fond par les ouvrages du stockage.

4.6.1.3 Des dispositions d'architecture et des exigences préservant les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien

D'autres dispositions relatives à la préservation des caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien sont retenues en complément de celles citées plus avant :

- l'orientation des alvéoles de stockage et des galeries de liaison et des quartiers de stockage devant recevoir des scellements selon la contrainte horizontale majeure. Cette disposition limite l'extension verticale de l'endommagement du Callovo-Oxfordien à leur pourtour et préserve ainsi au maximum des épaisseurs de Callovo-Oxfordien non endommagée (sain) de part et d'autre ;
- la limitation des températures dans le Callovo-Oxfordien pour les déchets exothermiques, les dispositions d'architecture et les exigences visent à préserver les performances des composants ouvragés, notamment celles des colis de déchets HA et des alvéoles de stockages de déchets MA-VL et HA ;
- la disposition des colis de déchets HA et des colis de déchets MA-VL dans des quartiers distincts éloignés de plusieurs centaines de mètres, la distance de plusieurs dizaines de mètres entre les alvéoles MA-VL et la séparation de familles de colis de déchets MA-VL potentiellement en interaction dans des alvéoles distincts. Cet ensemble de dispositions permet de limiter les interactions physico-chimiques (thermique, hydraulique, mécanique, chimique) entre les colis de déchets de différente nature, et donc favorise la préservation de leurs performances. Cela se traduit par exemple par des valeurs des entraxes entre alvéoles MA-VL et par l'identification de familles de colis de déchets MA-VL co-stockables ou non ;
- les températures maximales transitoires dans le Callovo-Oxfordien, liées aux déchets exothermiques, principalement les déchets HA, sont définies (inférieures à 100 °C) afin de limiter toute transformation minéralogique qui aurait un effet sur les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien. Par ailleurs, on vérifie a posteriori que la réponse thermo-hydromécanique du Callovo-Oxfordien ne perturbe pas les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien, par exemple par fracturation ;
- les bétons présents dans l'alvéole de stockage des colis de déchets MA-VL contribuent à maintenir un domaine de pH au sein de l'alvéole favorable à la durabilité de certains colis de déchets MA-VL (boues bitumées, déchets métalliques) et à une faible solubilité (donc une faible mobilité en solution) de l'essentiel des substances radioactives en particulier les actinides, le béton constitutif des conteneurs de stockage MA-VL apportant une quantité de béton complémentaire.

4.6.1.4 Des scellements limitant la circulation d'eau au sein des ouvrages souterrains

De par leur position en sortie du stockage, les scellements des liaisons surface-fond assurent le rôle le plus important parmi l'ensemble des scellements, en contribuant à limiter les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes. Les scellements dans les galeries augmentent leur résistance hydraulique et contribuent à de faibles vitesses d'écoulement d'eau dans l'installation. Les scellements d'alvéoles de colis de déchets MA-VL participent au confinement au plus près des déchets. Ce rôle est conforme au guide de sûreté n° 1 de l'ASN publié en 2008 qui indique : « *Les liaisons jour-fond et éventuellement certaines galeries et certains ouvrages de l'installation de stockage devront faire l'objet de scellements assurant une étanchéité de qualité spécifiée. Cette préoccupation doit être intégrée dès leur conception* » (8).

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo - Synthèse des options de sûreté- Synthèse en réponse à l'avis de l'autorité environnementale
L'évaluation de sûreté après fermeture

Ces scellements tirent parti de l'absence de zone endommagée connectée dans l'unité litho-stratigraphique silto-carbonatée au toit du Callovo-Oxfordien pouvant constituer une zone de perméabilité élevée : la mise en place d'un noyau à base d'argile gonflante de (très) faible perméabilité dans cette unité au contact direct des argilites avec le retrait des revêtements-soutènements permet ainsi de concevoir des scellements dont la perméabilité globale à saturation est faible (à ce stade de l'ordre de 10^{-11} m.s^{-1}).

En cas de perte de la fonction hydraulique des scellements verticaux ou inclinés des liaisons surface-fond, les scellements dans les galeries des ouvrages souterrains limitent les flux d'eau et les flux de radionucléides transportés en solution le long des galeries jusqu'à la base des liaisons surface-fond.

4.6.1.5 Des colis de stockage HA empêchant puis limitant le relâchement des radionucléides

L'Andra conçoit au mieux (en tenant compte des incertitudes scientifiques, des limites technologiques et des facteurs économiques) un conteneur de stockage HA pour lui conférer la plus grande durabilité possible d'étanchéité de manière à permettre un retour à une température suffisamment basse vis-à-vis de la maitrise du comportement des substances radioactives dans le Callovo-Oxfordien, et de la faible dissolution de la matrice verre du fait de la présence d'eau. Cette durabilité permet également de mobiliser les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien qu'après que l'activité radiologique contenue dans les déchets ait suffisamment décru.

Cette conception s'effectue de manière conjointe avec celle de l'alvéole, qui impose au conteneur ses conditions d'environnement. L'Andra retient à ce stade de vérifier que l'étanchéité à l'eau du conteneur de stockage HA sera maintenue à minima tant que la température à cœur du verre est supérieure à 50 °C pour les déchets HA0 (moyennement exothermiques) livrés avant 2075 et à 70 °C pour les déchets HA1/HA2 (fortement exothermiques) livrés au-delà de 2075. Avec l'architecture retenue pour l'installation souterraine, ces limites correspondent à une durée de moins de 500 ans après la fermeture de Cigéo.

Une fois le conteneur de stockage ayant perdu son étanchéité, le verre, de par sa lente dissolution, limite efficacement le relâchement des produits de fission, d'activation et les actinides mineurs qui y sont incorporés.

4.7 Les activités de contrôles et surveillance mises en place dès la construction initiale en vue de la protection à long terme après fermeture

Les activités de surveillance qui seront menées sur le centre de stockage Cigéo intègrent sa spécificité notamment l'installation souterraine et son environnement géologique, la fermeture de l'installation souterraine et un fonctionnement passif en après fermeture, en lien avec l'objectif de protection à long terme et des composants importants pour satisfaire cette protection à long terme.

Des activités de surveillance sont en œuvre dès la construction du centre de stockage Cigéo, puis pendant la phase de fonctionnement. Elles visent notamment à s'assurer de l'état et du comportement des différents composants importants du système de stockage, avant et dès la construction (cas de la couche du Callovo-Oxfordien) puis pendant la phase de fonctionnement (cas de colis de déchets radioactifs par exemple) avant la fermeture.

Pour ce qui concerne les conteneurs de stockage HA, compte tenu de leur importance, des opérations de contrôles lors de la mise en conteneur des colis primaires HA, pendant la soudure de la tête sur le corps du conteneur et après sont mises en place dans l'installation pour garantir les exigences définies.

Sur la liste des besoins identifiés, pour ce qui concerne la surveillance des alvéoles et colis de stockage HA vis-à-vis de la fonction « limiter le relâchement des substances radioactives et les immobiliser dans le stockage », l'Andra identifie le besoin de surveiller les conditions d'ambiance de l'alvéole (température, hygrométrie et présence d'eau liquide, présence d'O_2 ou d'H_2), la composition chimique de l'eau liquide récupérée en tête d'alvéole, les venues d'eau ou traces d'humidité en particulier au niveau de l'interface entre l'alvéole et les argilites, les déformations des chemisages et des colis et l'état de corrosion des conteneurs.

Pour ce qui concerne la surveillance des alvéoles de stockage MA-VL vis-à-vis de la même fonction de sûreté, l'Andra identifie le besoin de surveiller les conditions d'ambiance de l'alvéole ainsi que les déformations de l'alvéole et des colis, ainsi que les déplacements et l'état physico-chimique des colis.

La surveillance après fermeture dont la durée minimale sera fixée par l'Autorité de sureté nucléaire (ASN) dans le décret de démantèlement et de fermeture de l'INB, comprendra des dispositifs déjà mis en place avant la fermeture définitive et maintenus si besoin après la fermeture du centre de stockage Cigéo et préconisera éventuellement des dispositifs complémentaires.

Tous les dispositifs de suivi après fermeture seront choisis de manière à préserver la couche du Callovo-Oxfordien afin qu'elle puisse jouer pleinement son rôle central et sans intervention vis-à-vis de la protection à long terme de l'homme et l'environnement.

Plusieurs pistes sont à ce stade envisageables : techniques non intrusives en surface (géophysique…), mesures dans des forages instrumentés réalisés depuis la surface jusqu'à l'Oxfordien calcaire situé au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien.

Suite au décret et à l'issue des opérations préalables à la fermeture définitive de l'installation, une autorisation de l'ASN viendra autoriser le passage en phase de surveillance sur la base d'un dossier de l'Andra qui portera notamment la démonstration de l'efficacité des actions de surveillance. Cette autorisation précisera également les modalités envisagées pour la conservation et la transmission de la mémoire de l'installation pendant et après la phase de surveillance.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Illustration du processus d'instruction d'un dossier d'options de sûreté	9
Figure 1-2	Des options de sûreté à l'autorisation de création de l'installation nucléaire (INB) du centre de stockage Cigéo	10
Figure 1-3	Illustration du processus itératif reliant acquisition de connaissances, conception et sûreté	11
Figure 1-4	Des itérations de sûreté/conception/connaissances qui se sont échelonnées depuis 1991	13
Figure 1-5	Localisation du centre de stockage Cigéo dans l'Est de la France	15
Figure 1-6	Schéma d'organisation de principe du centre de stockage Cigéo au stade des options de sûreté	16
Figure 1-7	Schéma de principe de l'organisation spatiale du bâtiment nucléaire EP1 et de la tête de descenderie colis	17
Figure 1-8	Illustration du principe de séparation des différentes zones et liaisons surface-fond (dimensions et proportions des zones non représentatives)	18
Figure 1-9	Schéma des principales phases temporelles de développement du centre de stockage Cigéo	20
Figure 2-1	Illustration des types d'exposition à la radioactivité	24
Figure 2-2	Décroissance de la radioactivité dans le temps des déchets radioactifs des déchets HA0, HA1/HA2 et MA-VL	26
Figure 2-3	Illustration des liens sûreté-conception-connaissances	28
Figure 2-4	Illustration du système de stockage après fermeture	31
Figure 2-5	Schéma illustrant les processus de décroissance, d'atténuation et de retard des radionucléides	33
Figure 2-6	Illustration d'un colis primaire de déchets HA	36
Figure 2-7	Illustration d'un colis primaires de déchets MA-VL	37
Figure 2-8	Schéma du processus d'utilisation des connaissances des colis dans les études de conception et de sûreté	39
Figure 2-9	La zone d'implantation des ouvrages souterrains	44
Figure 2-10	Illustration d'un colis de stockage de déchets vitrifiés avec son conteneur de stockage	47
Figure 2-11	Illustration d'essais réalisés sur conteneurs HA	47
Figure 2-12	Illustration d'un colis de stockage MA-VL	48
Figure 2-13	Illustration des étapes de fabrication de prototypes de conteneurs de stockage MA-VL	49
Figure 2-14	Cheminement des colis de déchets jusqu'à leur emplacement de stockage	51
Figure 2-15	Coupe longitudinale schématique d'un alvéole HA	55
Figure 2-16	Coupe longitudinale schématique d'un alvéole MA-VL	56
Figure 2-17	Schéma de principe des scellements de liaison surface-fond	57
Figure 3-1	Voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques	64
Figure 3-2	Illustration de colis de stockage déchets radioactifs MA-VL placés en hotte pour leur transfert vers l'installation souterraine	66
Figure 3-3	Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements ionisants	68
Figure 3-4	Illustration du principe de ventilation en alvéole MA-VL	75
Figure 3-5	Illustration de ponts roulants sécurisés	77
Figure 3-6	Illustration du pont stockeur de colis de déchets MA-VL	78
Figure 3-7	Illustration des dispositifs du transfert incliné par funiculaire	80

Figure 3-8	Illustration de la manutention des colis de déchets radioactifs MA-VL à faible hauteur	81
Figure 3-9	Équipements de manutention de colis MA-VL-	81
Figure 3-10	Illustration des essais de résistance au feu des colis	84
Figure 3-11	Batteries des moyens de manutention des colis de déchets	88
Figure 3-12	Illustration des principes fort de gestion de la co activité	97
Figure 3-13	Vue d'ensemble d'un puits (principe)-	102
Figure 3-14	Pont stockeur dans la partie d'un alvéole de stockage MA-VL	107
Figure 4-1	Illustration schématique de l'analyse des risques et incertitudes de connaissances scientifiques et technologiques et des modalités de leur gestion	119
Figure 4-2	Illustration schématique de l'établissement de la liste de scénarios à quantifier sur la base de l'analyse des risques et incertitudes	119
Figure 4-3	Illustration schématique de la conceptualisation des scénarios après fermeture	123
Figure 4-4	Illustration des voies de transfert à l'homme	124
Figure 4-5	Schéma illustrant les différentes étapes de choix et de description des biosphères	126
Figure 4-6	Illustration schématique des modalités de choix des modèles de relâchement des radionucléides	131
Figure 4-7	Illustration des exutoires retenus à ce stade des options de sûreté	140
Figure 4-8	Représentation schématique des voies de transfert depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère	142
Figure 4-9	Illustration de la répartition de l'inventaire en Iode 129 à 1 million d'années en scénario d'évolution normale (situation de référence)	143
Figure 4-10	Illustration des panaches de concentration de l'uranium 238 et du neptunium 237 (en mole/m³ d'eau) dans le Callovo-Oxfordien autour d'un alvéole de déchets HA à 1 million d'années : scénario d'évolution normale	144
Figure 4-11	Illustration montrant la différence entre l'évolution normale et une situation possible de défaillance de scellement pouvant induire une « déviation » de l'évolution normale	147
Figure 4-12	Illustration de la répartition de l'inventaire initial en Iode 129 à 1 million d'années en scénario de dysfonctionnement de tous les scellements	148
Figure 4-13	Illustration schématique du scénario d'évolution altérée défaut de conteneur de stockage HA	149
Figure 4-14	Illustration des typologies de forages associés aux intrusions humaines involontaires au stade des options de sûreté	151

Tableaux

Tableau 2-1	Fonctions de sûreté nucléaire en phase de fonctionnement et principes retenus	34
Tableau 2-2	Principes de conception, en regard des fonctions de sûreté après fermeture du système de stockage	52
Tableau 3-1	Objectifs de radioprotection retenus par l'Andra	63
Tableau 3-2 :	Bilan des principales situations retenues	105
Tableau 3-3 :	Bilan des conséquences radiologiques maximales au public pour les principaux situations incidentelles et accidentelles retenues	108
Tableau 4-1	Scénario d'évolution normale : historique des doses aux exutoires pour les biosphères tempérée et chaude pour deux implantations du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien	145

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Dossier d'options de sûreté - partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf.

2 Dossier d'options de sûreté - partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). Document N°G-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.

3 Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le centre de stockage Cigéo (52-55). Autorité environnementale (2021), N°Ae 2020-79.

4 Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1992). Journal officiel de la République française, N°1.

5 Règle n°III.2.f du 10 juin 1991 - Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stock. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (1991). Règles fondamementales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs.

6 Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (2006). Journal officiel de la République française, N°93, pp.9721.

7 Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (2016). Journal officiel de la République française.

8 Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008). 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/guide_RFSIII_2_fV1_2_.

9 Directive n°2011/70/EURATOM du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs. Conseil de l'Union Européenne (2011). Journal officiel de l'Union européenne, N°L199, pp.48-56.

10 Dossier de concertation sur la phase industrielle pilote de Cigéo. Andra (2021). Document N°DDP/DICOM/21-0001. Disponible à l'adresse : https://concertation.andra.fr/media/default/0001/01/89bf5a91e232a401be57b1a65dd07c58b0975caf.pdf.

11 Post-closure safety case for geological repositories: nature and purpose. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2004). NEA 3679. 56 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2004/nea3679-closure.pdf.

12 "Reference biospheres" for solid radioactive waste disposal. Report of biomass theme 1 of the Biosphere modelling and Assessment (BIOMASS) programme. IAEA (2003). IAEA-BIOMASS-6. 560 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Biomass6_web.pdf.

13 Rapport global d'évaluation des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 Décembre 1991. Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE) (2006). 38 p. Disponible à l'adresse : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/064000240.pdf.

14 Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. Version consolidée au 21 octobre 2019 (2019).

15 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. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2009).

16 Avis n°2010-AV-0084 du 5 janvier 2010 de l'ASN sur le dossier de l'agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA) relatif à la proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface pour un stockage réversible en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2010). 5 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2010-AV-0084-du-5-janvier-2010-de-l-ASN.

17 Monfort, M., Lambert Wentzler, L., Patryl, L., Armand, P. Présentation de la plate-forme CERES destinée à l'évaluation des conséquences sanitaires des rejets de polluants dans l'environnement. Radioprotection (2019). Vol 54, N°3, pp.195-201.

18 Dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOARV000001500059. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-11/CG-TE-D-NTE-AMOA-RV0-0000-15-0059-A%20DOREC.pdf.

19 Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat (2010). Bulletin officiel du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, N°2010/12, pp.125-246.

20 Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation (2005). Journal officiel de la République française. Vol 234, N°DEVP0540371A.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00
www.andra.fr

© Andra • 2021 • Création graphique : Agence Les Récréateurs • Crédits photos : Andra

Annexe 2 Programme des études de conception, de R&D et de sûreté depuis les options de sûreté en vue du dossier d'autorisation de création et de son instruction

Comme indiqué dans le chapitre 2.4.1 du volume II de l'étude d'impact, l'Andra a remis en avril 2016 à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) un dossier d'options de sûreté (DOS) sur le projet de centre de stockage de déchets radioactifs pour les déchets de haute activité (HA) et moyenne activité à vie longue (MA-VL), Cigéo. Les options de sûreté s'appuyaient sur un socle de connaissances scientifiques et technologiques acquis sur plus de vingt ans en accompagnement du développement progressif de la conception et de l'évaluation de la sûreté associée tant en exploitation qu'à long terme après fermeture.

L'instruction de ce dossier de sûreté par l'ASN était une étape importante avant le dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC) qui s'inscrivait pour l'Andra dans la suite des itérations de sûreté déjà réalisées (Cf. Chapitre 2.4.1 du volume II de l'étude d'impact). À ce stade, l'Andra souhaitait porter à connaissance de l'ASN les pièces dont elle disposait, en amont de la DAC, pour identifier les études qu'il lui restait à mener jusqu'à cette prochaine étape.

Dans le cadre de son instruction, l'ASN a saisi son appui technique, l'IRSN. Elle a fait examiner ce dossier par les groupes permanents d'experts placés auprès d'elle. Elle a également soumis le DOS à une revue internationale par des experts issus d'autorités de sûreté étrangères, coordonnée par l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique).

À l'issue de cette instruction, l'ASN a rendu son avis le 11 janvier 2018 (55) dans lequel elle a mentionné que « *le projet Cigéo a atteint dans son ensemble une maturité technique satisfaisante au stade du dossier d'options de sûreté* ».

L'ASN a adressé par ailleurs une lettre de suite à l'Andra (52) précisant les options de sûreté jugées satisfaisantes ainsi que les sujets nécessitant une attention particulière restant à approfondir ou à compléter en vue de la demande d'autorisation de création (DAC). Parmi ces points, la question des déchets bitumés présentait un caractère singulier puisque l'ASN considérait qu'en l'état de la conception de l'installation telle que présentée dans les options de sûreté, ces colis ne pouvaient être stockés en l'état dans le centre de stockage Cigéo. L'ASN a donc demandé dans son avis que des études complémentaires soient menées en vue d'une future prise de décision quant à leur gestion.

2.1 La feuille de route de l'Agence jusqu'à la DAC, intégrant les demandes de l'ASN et les engagements de l'Andra repris dans la lettre de l'ASN du 12 janvier 2018 faisant suite à l'instruction du DOS

L'Andra a continué, depuis le DOS, ses études afin de consolider les options de sûreté, compléter la démonstration de sûreté et le cas échéant présenter et justifier les évolutions. Ces études, qui intègrent également les éléments permettant de répondre aux demandes de l'ASN, concernent la poursuite de la conception en avant-projet, les évaluations de la sûreté en exploitation et après fermeture et la consolidation des acquis de connaissances scientifiques et technologiques. Ce dernier point concerne notamment le milieu géologique et le système de stockage comme par exemple :

- la représentation plus fine du Dogger et de l'Oxfordien carbonaté, formations encaissantes de la couche de Callovo-Oxfordien dans le cadre de la modélisation de l'évolution des écoulements en après fermeture ;
- la représentation du transitoire hydraulique-gaz du système de stockage en après fermeture.

En ce qui concerne les dispositions de maîtrise des risques définies au stade des options de sûreté, celles-ci ont été complétées pour apporter des compléments de démonstration de la sûreté en exploitation et après fermeture, par exemple:

- l'identification des éléments importants pour la protection ;
- la prise en compte de l'ensemble des scénarios et des biosphères types comme annoncées dans le dossier d'options de sureté ;
- l'évaluation de sensibilité des indicateurs de performance et de sûreté à des paramètres de la conception (architecture par exemple) et des composants.

L'Andra a précisé le dimensionnement des bâtiments de surface, des locaux et des moyens de manutention via la poursuite des études de conception en avant-projet.

L'Andra a également poursuivi le développement des dispositifs de surveillance en lien avec sa stratégie de surveillance. Ces éléments, ont été obtenus via notamment :

- la poursuite de tests en Laboratoire souterrain de différents capteurs (fibres optiques, mesure de l'atmosphère dans les alvéoles par exemple) ;
- la participation à des projets internationaux comme le projet européen MODERN 2020 sur les dispositifs de monitoring dont l'Andra a été le pilote.

Concernant les colis, l'Andra a continué ses actions pour compléter les spécifications préliminaires d'acceptation des colis en lien étroit avec les avancées sur la connaissance des colis, la conception et de la démonstration de sûreté sur la base de la méthodologie jugée satisfaisante dans son principe par l'ASN dans son avis du n° 2020-AV-0369 du 1er décembre 2020 émis dans le cadre de l'élaboration du cinquième PNGMDR (56).

Ces études et actions permettent de répondre aux attendus de l'ASN en vue de l'autorisation de création, notamment en ce qui concerne la justification des solutions techniques retenues et de leurs performances en regard des fonctions et exigences à satisfaire.

Les études relatives aux performances du système de stockage se sont ainsi poursuivies depuis le DOS, en lien avec l'avancement des études d'avant-projet et des essais technologiques menés au Laboratoire souterrain concernant notamment :

- les *alvéoles HA* en regard des justifications en matière de faisabilité technologique et de performance en exploitation et en après fermeture ;
- les *alvéoles MA-VL* en regard des justifications en matière de dimensionnement mécanique (conception et dimensionnement des revêtement/soutènement…) ;
- *les ouvrages de fermeture* en regard des justifications en matière de faisabilité et de maîtrise de leurs performances et de celle du stockage en grand sur le long terme.

Le Laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne joue ainsi un rôle important dans le cadre des études complémentaires menées depuis le DOS en vue de la demande d'autorisation de création, notamment par la prolongation de galeries permettant de mener les essais technologiques relatifs aux alvéoles HA.

Enfin, l'ASN a demandé que soient jointes au dossier de DAC des études d'adaptabilité du stockage, dans le centre de stockage Cigéo, des déchets de l'inventaire de réserve. Ces études, dont l'objectif est de réaliser une esquisse des concepts retenus pour l'éventuel stockage de ces déchets et d'apporter la démonstration que la conception retenue préserve la possibilité technique de l'accueil de ces déchets, se sont poursuivies, selon la démarche établie par l'Andra dans le cadre du PNGMDR 2016-2018.

Dans le cadre du processus normal de développement du projet de centre de stockage Cigéo, et des boucles d'itérations sûreté/conception/connaissances, les études réalisées depuis le DOS permettront dans les prochains mois de constituer le dossier de demande d'autorisation de création. Ce dossier fera l'objet d'un processus d'instruction conformément au code de l'environnement dont un examen technique approfondi par l'ASN et son support technique l'IRSN comme pour le DOS. À partir d'un dossier dont le niveau de maturité était déjà reconnu par l'ASN, ces études permettent à l'Andra de consolider la conception du centre de stockage et sa démonstration de sûreté, et les connaissances scientifiques et technologiques sur lesquelles elles reposent.

2.2 Cas particulier des déchets bitumés mentionnés dans la lettre de suite de 2018

Pour la grande majorité des déchets prévus dans le centre de stockage Cigéo (plus de 80 %), l'ASN a considéré que les options de sûreté étaient satisfaisantes au stade du dossier d'options de sûreté. L'ASN a cependant identifié un point de vigilance pour un type de colis spécifique, les colis de déchets bitumés. Les colis de déchets bitumés sont des déchets MA-VL qui représentent 18 % de l'inventaire actuel de référence en nombre de colis de déchets prévus dans le centre de stockage Cigéo.

Pour le stockage des fûts de déchets bitumés, l'ASN a considéré qu'il était nécessaire, pour envisager le stockage en l'état de ces colis de déchets « *de présenter, dans le dossier de demande d'autorisation de création, des modifications de conception pour exclure le risque d'emballement des réactions exothermiques, concernant notamment :*

- *les dispositions de surveillance permettant de détecter au plus tôt une montée progressive de la température ;*
- *les dispositions prévues en cas d'incendie pour empêcher des réactions exothermiques des colis de déchets bitumés et la propagation à un ou d'autres colis ;*
- *les mesures de limitation des conséquences vis-à-vis de la dissémination de matière radioactive à la suite d'une dégradation thermique des colis. »*

Conformément à cette demande, l'Andra a mené des études et défini des évolutions de la conception de l'alvéole de stockage de colis de déchets bitumés pour d'une part rendre hautement improbable le risque d'emballement des fûts d'enrobés bitumés et d'autre part d'écarter le risque de propagation d'un tel emballement s'il se produisait. Les dispositions prises consistent notamment à réduire au maximum le risque d'incendie à proximité et à maîtriser la température dans l'ambiance des colis de stockage ainsi qu'à renforcer la capacité à surveiller/détecter et intervenir au sein de l'alvéole.

En parallèle, le CEA pilote des études sur les modalités de traitement de ces déchets qui permettraient de neutraliser leur réactivité chimique, préalablement à leur stockage, afin de déterminer si une telle neutralisation serai réalisable si elle s'avérait nécessaire, dans quelles conditions et avec quel impact.

Par ailleurs, ceci a fait l'objet d'une revue par des experts nationaux et internationaux, académiques et non académiques. Elle a conduit à un rapport, remis aux autorités commanditaires de cette revue, le 28 juin 2019 (cf. Chapitre 2.4.3.2-d du volume II de l'étude d'impact). Dans leurs conclusions, les experts notent que les actions proposées concernant la caractérisation des déchets bitumés, la neutralisation de leur réactivité chimique et les évolutions de la conception du centre de stockage Cigéo ouvrent de nouvelles perspectives quant aux conditions potentielles d'acceptation des colis de déchets bitumés dans le centre de stockage.

En accord avec les conclusions de cette revue, pour le dossier de demande d'autorisation de création, l'Andra maintient deux voies possibles pour le stockage des fûts de déchets bitumés sans préjuger d'une voie préférentiellement à une autre :

- un mode de stockage des fûts de déchets bitumés (sans traitement préalable) mis dans des conteneurs en béton renforcés et dans des alvéoles dédiés conformément à sa démarche présentée dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 ;
- un mode de stockage de colis de déchets issus du traitement éventuel des fûts de déchets bitumés visant la neutralisation de leur réactivité chimique. Des hypothèses sont retenues pour définir le conditionnement de ce type de colis, positionner ces colis dans l'architecture souterraine et justifier la compatibilité de leur stockage.

Les actions menées par l'Andra et le CEA permettront de fournir aux pouvoirs publics les éléments nécessaires pour que l'option la plus favorable, au regard des enjeux de sûreté, de radioprotection et d'environnement puisse être retenue et donc pour déterminer dans quelles conditions les colis de déchets bitumés pourront être stockés.

En tout état de cause, les colis de déchets bitumés ne seront admis sur le centre de stockage Cigéo que dès lors que leur sûreté aura été pleinement garantie, soit par des dispositions de conception et de caractérisation, soit par un reconditionnement en amont. Dans tous les cas, ils ne seront pas réceptionnés dès les premières années de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1 Schéma d'organisation de principe du centre de stockage Cigéo 10
Figure 1-2 Localisation des installations du centre de stockage Cigéo 10
Figure 1-3 Projet global Cigéo et périmètre de son étude d'impact 11
Figure 2-1 Carte de localisation des sites d'expédition des colis de déchets radioactifs vers le centre de stockage Cigéo 18
Figure 2-2 Projet global Cigéo et périmètre de son étude d'impact 19
Figure 2-3 À gauche : Traçages hydrogéologiques et directions globales des écoulements dans les Calcaires du Barrois depuis la zone descenderie ; à droite : protection réglementaire des captages AEP (PPI : périmètre de protection immédiat ; PPR : périmètre de protection rapproché ; PPR périmètre de protection éloigné) dans l'aire d'étude éloignée. 32
Figure 2-4 Tracé de la zone potentielle d'incidence (et incertitudes associées en pointillés) des installations de surfaces ZD et ZP du projet Cigéo) sur les eaux souterraines des calcaires du Barrois 32
Figure 2-5 Carte des corridors écologiques identifiés dans le SRADDET 36
Figure 2-6 Photographies réalisées par drone du corridor écologique défini dans le SRADDET entre le Bois Lejuc et la forêt de Montier (Andra - 2021) 36
Figure 2-7 Localisation des pylônes au sein des sites Natura 2000 de l'étang de la Horre et de la Réserve Naturelle Nationale (RNN) 38
Figure 2-8 Photographie du camion incendié au WIPP (37) 44
Figure 2-9 Échelles de fracturation du granite (extrait du Dossier 2005 Granite, Andra 2005 (20) 47
Figure 2-10 Étude de l'implantation d'alvéoles de stockage MA-VL en tenant compte de la fracturation du granite (vue en plan, extrait du Dossier 2005 Granite, Andra 2005) 48
Figure 2-11 Principes de conteneur et d'alvéole de stockage de combustible usé en Suède et en Finlande 50
Figure 2-12 Zone souterraine optimisant les critères géologiques au sein de la zone de transposition 54
Figure 2-13 Présentation des possibilités d'implantation des installations de surface sur la base des critères environnementaux 55
Figure 2-14 Propositions de ZIRA 55
Figure 2-15 Scénarios d'implantation en surface 56
Figure 2-16 La ZIRA proposée par l'Andra au terme de la démarche de consultation 56
Figure 2-17 Options d'implantation des installations de surface présentées par l'Andra au débat public de 2013 57
Figure 2-18 Pont stockeur dans la partie d'un alvéole de stockage MA-VL 60
Figure 2-19 Contribution des isotopes à la dose à court terme (Bure, Adulte, F3) 61
Figure 2-20 Contribution des isotopes à la dose efficace totale à moyen terme (Adulte, Bure, F3) 61
Figure 2-21 Photographie d'un camion-centre de livraison de carburant 62
Figure 2-22 Schéma présentant les modèles et codes utilisés pour la dispersion atmosphérique et les calculs de dose 65
Figure 2-23 Schéma cartographique localisant les cibles étudiées pour les calculs de dispersion atmosphérique ainsi que le maximum du domaine d'étude 66
Figure 2-24 Interprétation du profil pétrolier 88BIE02 montrant l'amortissement du fossé de Gondrecourt en profondeur au toit du Permien (voir Figure 2-25 pour la localisation) 69
Figure 2-25 Schéma structural illustrant le fossé de Gondrecourt en bordure sud-orientale de la ZT et localisation du profil sismique 88BIE02 de la Figure 2-24 69
Figure 2-26 Sismicité historique (base SisFrance à gauche) et instrumentale (base SiHex – Cara et al., 2015 à droite) et localisation de la région de Meuse/Haute-Marne 70
Figure 2-27 Carte de la sismicité naturelle de la « zone Andra » sur la période 1962- 2020 sur fond géologique (trimestre courant : octobre-novembre-décembre 2020) 70
Figure 2-28 Carte de la sismicité totale (naturelle, induite et tirs de carrière) de 1962 à 2020 72
Figure 2-29 Région Grand Est - Production de granulats par département 75
Figure 2-30 Distances du centre de stockage Cigéo des carrières d'approvisionnement potentielles et répartition par département du Grand Est 75
Figure 2-31 Taille des carrières d'approvisionnement de Cigéo potentielles pour l'approvisionnement du centre de stockage Cigéo et répartition par département du Grand Est 75
Figure 2-32 Carrières embranchées/pas embranchées et répartition par département du Grand Est 75
Figure 2-33 Localisation et production annuelle en tonnes des cimenteries les plus proches du centre de stockage Cigéo 76
Figure 2-34 Nombre de cimenteries et distances de par rapport au centre de stockage Cigéo 76
Figure 2-35 Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux de ruissèlement des verses 79
Figure 2-36 Schéma illustratif de la filière de traitement qualitatif des eaux usées et industrielles 80
Figure 2-37 Illustration du maintien des bandes boisées au niveau la zone puits 83
Figure 2-38 Localisation de la ZPS FR2112001 par rapport à la ligne électrique 400 kV 88
Figure 2-39 Plan de localisation de la portion de la ligne 400 kV faisant l'objet de travaux de sécurisation 90
Figure 2-40 Carrefour GCR2/GVA2 100
Figure 2-41 Schéma de boulonnage 100
Figure 2-42 Répartition des accidents et des soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3 101
Figure 2-43 Répartition des accidents et soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3 par siège de lésions 102

Tableaux

Tableau 1-1	Correspondance entre l'avis de l'Ae et le mémoire en réponse de l'Andra	6
Tableau 2-1	*Liens internet présentant des informations sur les installations des sites des producteurs*	20
Tableau 2-2	Composition chimique (moyenne ± écart-type) des argilites de la couche géologique du Callovo-Oxfordien	28
Tableau 2-3	Superficie des différents écosystèmes présents dans l'aire d'étude éloignée (Source : Corine Land Cover 2018 (CLC 2018)*	40
Tableau 2-4	Niveaux maximaux admissibles pour les denrées alimentaires (Bq/kg)	62
Tableau 2-5	Activité massique du sol à Bure (en Bq/kg)	67
Tableau 2-6	Impacts associés aux dépôts de radionucléides dans le sol pour un adulte habitant à Bure après exploitation (>150 ans)	68
Tableau 2-7	Nature des travaux envisagés au niveau des pylônes de la ligne 400 kV situés sur ou à proximité immédiate des sites Natura 2000	91
Tableau 2-8	Comparaison des méthodologies de l'évaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo et suggérée par l'Ae	92

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 L'évaluation environnementale. Ministère de la transition écologique (2019). Consulté le 21/05/2021. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/levaluation-environnementale.

2 Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le centre de stockage Cigéo (52-55). Autorité environnementale (2021), N°Ae 2020-79.

3 Réunion du 29 juin 2009 - Assemblée générale du Clis à Poissons, le 29 juin 2009. Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure (2009). 72 p. Disponible à l'adresse : http://clis-bure.fr/wp-content/uploads/2019/03/retranscription-29-06-09.pdf.

4 Dossier d'options de sûreté - partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf.

5 Dossier d'options de sûreté - partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). Document N°G-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.

6 Directive 2011/92/UE du Parlement européen et du Conseil du 13 décembre 2011 concernant l'évaluaiton des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement (2012). Journal officiel de l'Union européenne.

7 Décision n° 2017-DC-0587 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 23 mars 2017 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2017).

8 Le transport des matières radioactives : réglementation relative au transport de substances radioactives. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2021). Consulté le 07/06/2021. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/transport/transports-matieres-radioactives/Pages/2-transports-matieres-radioactives-reglementation.aspx#.YL3VOagzbIW.

9 Gaucher, E., Robelin, C., Matray, J.-M., Négrel, G., Gros, Y., Heitz, J.F., Vinsot, A., Rebours, H., Cassagnabere, A., Bouchet, A. Andra underground research laboratory: Interpretation of the mineralogical and geochemical data acquired in the Callovian-Oxfordian formation by investigative drilling. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C (2004). Vol 29, N°1, pp.55–77.

10 Belcourt, O. La perturbation chimico-minéralogique (Hydratation, état d'oxydation, eau interstitielle) de la zone perturbée excavée et ses relations avec la perturbation texturale et mécanique : Application aux argilites des galeries de Bure (2009). Université Henri Poincaré - Nancy 1. Thèse de doctorat, spécialité Sciences de la terre. 306 p.

11 Marty, N., Lach, A., Lerouge, C., Grangeon, S., Claret, F., Fauchet, C., Madé, B., Lundy, M., Lagroix, F., Tournassat, C., Tremosa, J. Weathering of an argillaceous rock in the presence of atmospheric conditions: a flow-through experiment and modelling study. Applied geochemistry (2018). Vol 96, pp.252–63.

12 Scholtus, N., Leclerc, E., Donato, P. de, Morel, J.L., Simonnot, M.O. Eluto-frontal chromatography to simulate chemical weathering of COx by low-molecular-weight organic compounds and early pedogenesis processes. European Journal of Soil Science (2009). Vol 60, N°1, pp.71–83.

13 Tremosa, J., Debure, M., Narayanasamy, S., Redon, P.O., Jacques, D., Claret, F., Robinet, J.-C. Shale weathering: A lysimeter and modelling study for flow, transport, gas diffusion and reactivity assessment in the critical zone. Journal of hydrology (2020). Vol 587, pp.124925.

14 Dossier de concertation sur la phase industrielle pilote de Cigéo. Andra (2021). Document N°DDP/DICOM/21-0001. Disponible à l'adresse : https://concertation.andra.fr/media/default/0001/01/89bf5a91e232a401be57b1a65dd07c58b0975caf.pdf.

15 rapport du groupe de travail sur les Recherches et Développements en matière de gestion des déchets radioactifs (octobre 1983 - octobre 1984) : "Rapport Castaing". Ministère du redéploiement industriel et du commerce extérieur; Conseil supérieur de la sûreté nucléaire (1983).

16 Bataille, C. Rapport sur la gestion des déchets nucléaires à haute activité. Sénat (1990). Disponible à l'adresse : https://www.senat.fr/rap/r90-184/r90-1841.pdf.

17 Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1992). Journal officiel de la République française, N°1.

18 Rapport d'évaluation n°2. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2008). 151 p. Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/telechargements/cne2/rapport%202%20-%20juin%202008.pdf?phpMyAdmin=XFyEwTnpqXv9qwtMxyZ8gJA7yIe.

19 Rapport d'évaluation n°3. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (1997). 248 p. Disponible à l'adresse : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/154000535.pdf.

20 Dossier 2005 Granite. Andra (2005). Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/267.pdf.

21 Rapport global d'évaluation des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 Décembre 1991. Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE) (2006). 38 p. Disponible à l'adresse : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/064000240.pdf.

22 Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2006). Disponible à l'adresse : https://www.cigeo.gouv.fr/sites/default/files/2018-08/AVIS-ASN-dechets-2006-02-01.pdf.

23 The final repository SFR. SKB (2021). Consulté le 09/06/2021. Disponible à l'adresse : https://www.skb.com/our-operations/sfr/).

24 Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008). 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/guide_RFSIII_2_fV1_2_.

25 Décision n°2015-DC-0508 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 21 avril 2015 relative à l'étude sur la gestion des déchets et au bilan des déchets produits dans les installations nucléaires de base. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2015).

26 Stockage réversible profond. Etape 2009. Proposition de zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation de surface. Andra (2010). Document N°C.RP.ADP.09.0035. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/391.pdf.

27 Réunion du 16 octobre 2008. Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure (2008). 84 p. Disponible à l'adresse : http://clis-bure.fr/wp-content/uploads/2019/03/retranscription-16-10-08.pdf.

28 La lettre du Clis : le Clis reste actif. Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure (2009). N°7. Disponible à l'adresse : http://clis-bure.fr/wp-content/uploads/2019/04/lettre7.pdf.

29 Courrier du Ministre au Président de l'Andra sur le choix de la ZIRA. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer en charge des technologies verte et des négociations sur le climat (2010).

30 Dossier du maître d'ouvrage pour le débat public sur le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs : 5ème édition du PNGMDR. Autorité de sûreté nucléaire (ASN); Ministère de la transition écologique et solidaire (2019). Disponible à l'adresse : https://pngmdr.debatpublic.fr/images/DMO-synthese/DMO.pdf.

31 Rapport préalable au débat public sur le projet de stockage géologique profond de déchets radioactifs Cigéo. Haut Comité sur la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) (2013). 30 p. Disponible à l'adresse : http://www.hctisn.fr/IMG/pdf/Rapport_GT_Cigeo_vf_cle8a687d.pdf.

32 Délibération du conseil d'administration de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs du 5 mai 2014 relative aux suites à donner au débat public sur le projet CIGEO. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2014). Journal officiel de la République française, N°108, pp.7851-4.

33 Bergerat, F., Elion, P., Frizon de Lamotte, D., Proudhon, B., Combes, P., André, G., Willeveau, Y., Laurent-Charvet, S., Kourdian, R., Lerouge, G., Ott D'Estevou, P. 3D multiscale structural analysis of the Eastern Paris Basin : the ANDRA contribution. Mémoires de la Société Géologique de France (2007). Vol 178, pp.15-35.

34 Pagel, M., Bonifacie, M., Schneider, D.A., Gautheron, C., Brigaud, B., Calmels, D., Cros, A., Saint-Bezar, B., Landrein, P., Sutcliffe, C., Davis, D., Chaduteau, C. Improving paleohydrological and diagenetic reconstructions in calcite veins and breccia of a sedimentary basin by combining Delta (sub 47) temperature, delta (super 18) O (sub water) and U/Pb age. Chemical geology (2018). Vol 481, pp.1-17.

35 Pisapia, C., Deschamps, P., Battani, A., Buschaert, S., Guihou, A., Hamelin, B., Bruhlet, J. U/Pb dating of geodic calcite: new insights on Western Europe major tectonic events and associated diagenetic fluids. Journal of the Geological Society of London (2017). Vol 175, N°1, pp.60-70.

36 Ziegler, P.A., Dèzes, P. Crustal evolution of Western and Central Europe. European lithospher dynamics (2006). Vol 32, pp.43-56.

37 Tesauro, M., Hollenstein, C., Egli, R., Geiger, A., Kahle, H.-G. Analysis of central Western Europe deformation using GPS and seismic data. Journal of Geodynamics (2006). Vol 42, N°4-5, pp.194-209.

38 Cara, M., Cansi, Y., Schlupp, A., Arroucau, P., Bethoux, N., Beucler, E., Bruno, S., Calvet, M., Chevrot, S., Deboissy, A., Delouis, B., Denieul, M., Deschamps, A., Doubre, C., Frechet, J., Godey, S., Golle, O., Grunberg, M., Guilbert, J., Haugmard, M., Jenatton, L., Lambotte, S., Leobal, D., Maron, C., Mendel, V., Merrer, S., Macquet, M., Mignan, A., Mocquet, A., Nicolas, M., Perrot, J., Potin, B., Sanchez, O., Santoire, J.-P., Sebe, O., Sylvander, M., Thouvenot, F., van der Woerd, J., van der Woerd, K. SI-Hex: a new catalogue of instrumental seismicity for metropolitan France. Bulletin de la société géologique de France (2015). Vol 186, N°1, pp.3-19.

39 Larroque, C., Ampuero, J.-P., Cornou, C. Aux origines du séisme du Teil. La recherche (2020), N°561, pp.94-7.

40 Ritz, J.-F., Baize, S., Ferry, M., Larroque, C., Audin, L., Delouis, B., Mathot, E. Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France. Communications Earth & Environment (2020). Vol 1, N°1.

41 Baize, S., Cushing, E., Lemeille, F., Jomard, H. Updated seismotectonic zoning scheme of Metropolitan France, with reference to geologic and seismotectonic data. Bulletin de la société géologique de France (2013). Vol 184, N°3, pp.225-59.

42 La récupérabilité des colis de déchets stockés dans Cigéo. Andra (2021). Document N°DDP/DICOM/20-0045.

43 Loi n°2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (2014). Journal officiel de la République française, N°0072, pp.5809.

44 Comment réparer des dommages écologiques graves ? Ministère de la transition écologique et solidaire (2018). 88 p. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Comment%20r%C3%A9parer%20des%20dommages%20%C3%A9cologiques%20graves_0.pdf.

45 Truchon, H., Billy, V. de, Bezombes, L., Padilla, B. Dimensionnement de la compensation ex ante des atteintes à la biodiversité : État de l'art des approches, méthodes disponibles et pratiques en vigueur. OFB (2020). Disponible à l'adresse : https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/dimensionnement-de-la-compensation-ex-ante-des-atteintes-a-la-biodiversite-etat-de-l-art-des-approch0.

46 Plan biodiversité. Ministère de la transition écologique et solidaire (2018). 24 p. Disponible à l'adresse : https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-31626-plan-biodiversite.pdf.

47 Dantec, R. Rapport de commission d'enquête N° 517 (2016-2017) (Tome 01) au nom de la commission d'enquête président m. Jean-François Longeot sur la réalité des mesures de compensation des atteintes à la biodiversité engagées sur des grands projets d'infrastructures, intégrant les mesures d'anticipation, les études préalables, les conditions de réalisation et leur suivi. Sénat (2017). Disponible à l'adresse : http://www.senat.fr/rap/r16-517-1/r16-517-1_mono.html.

48 Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides. ONEMA (2016). 191 p. Disponible à l'adresse : http://www.zones-humides.org/sites/default/files/images/methode%20ZH/guidezh-complet.pdf.

49 Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo. Pièce 13 - Evaluation économique et sociale des infrastructures de transport du projet global Cigéo. Andra (2020). Document N°CG-TE-D-RAP-AMOA-EEE-0000-19-0081. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2020-11/Pi%C3%A8ce-13-Evaluation%20%C3%A9conomique%20et%20sociale%20infra%20transport.pdf.

50 Avis du SGPI n°2021-71 : procédure contre-expertise du dossier d'évaluation socio-économique du projet global Cigéo. Secrétaire général pour l'investissement; Premier ministre (2021). Disponible à l'adresse : www.andra.fr/sites/default/files/2021-03/Avis_Cig%C3%A9o_SGPI.pdf.

51 Bouttes, J.-P., Gollier, C., Mascle Allemand, A.-L., Pommeret, A., Preud'homme, E. Contre-expertise de l'évaluation socioéconomique du projet de CIGEO. Secrétaire général pour l'investissement (2021). 85 p. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2021-03/Rapport%20Contre%20expertise%20independante%20CIGEO%20VF.pdf.

52 Lettre ASN CODEP-DRC-2018-001635 du 12 Janvier 2018 relative au Dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018).

53 Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN); Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2011). 120 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/Guide-Gestion-des-sites-potentiellement-pollues-par-des-substances-radioactives.

54 Rapport d'évaluation n°8. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2014). Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/telechargements/RAPPORT_CNE2_8_062014.pdf.

55 Avis n°2018-AV-0300 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018). Disponible à l'adresse : http://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2018-AV-0300-de-l-ASN-du-11-janvier-2018.

56 Avis n°2020-AV-0369 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er décembre 2020 sur les études concernant la gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL), remises en application du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018, en vue de

l'élaboration du cinquième plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2020).

© Andra • 2021 • Création graphique : Agence Les Récréateurs • Crédits photos : Andra

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00

www.andra.fr