RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA

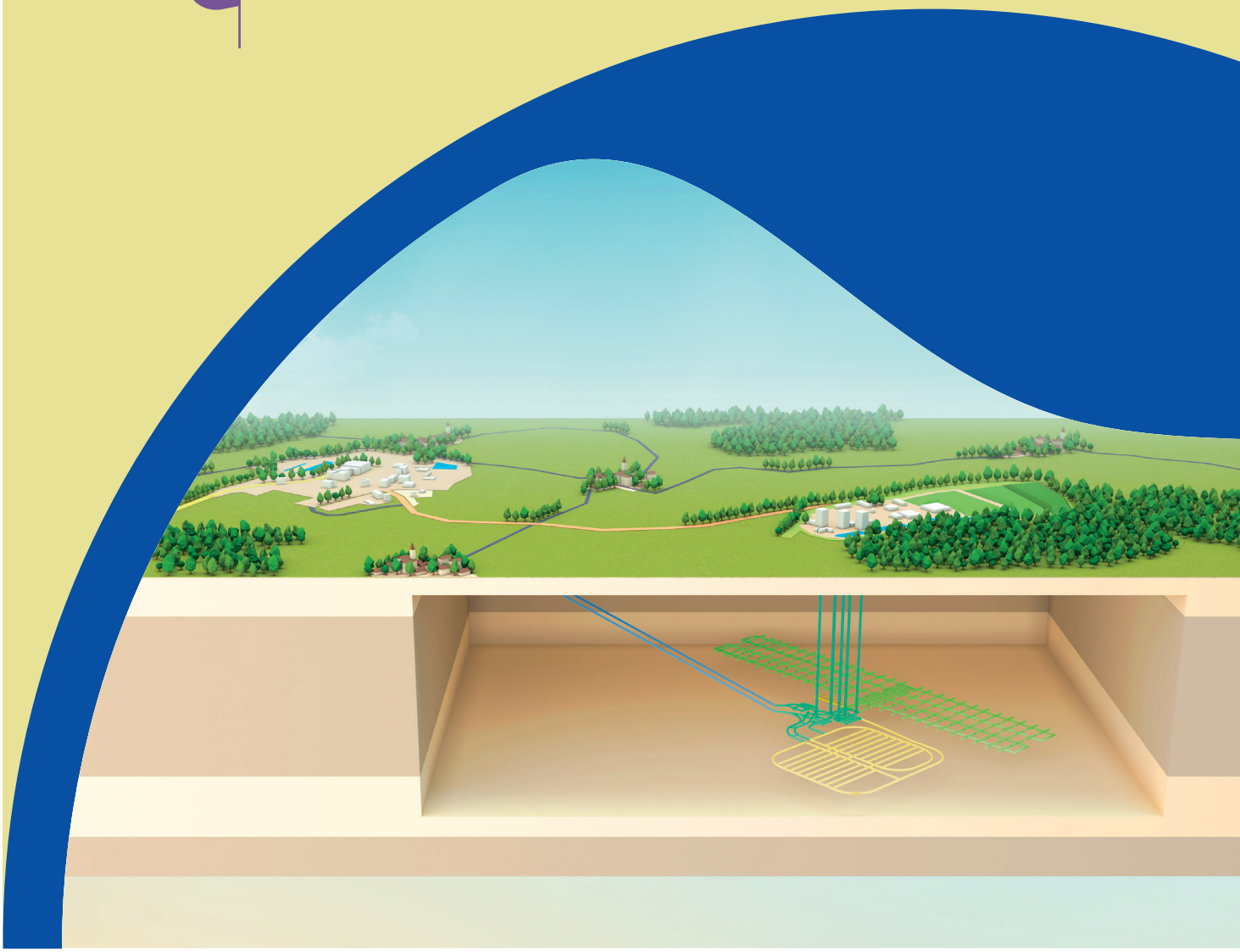
2026

DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE (INB) CIGÉO

PIÈCE 8BIS

Étude de maîtrise des risques

RÉSUMÉ NON TECHNIQUE



MISE À JOUR DU DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION POUR ENQUÊTE PUBLIQUE

À la suite de l'instruction technique par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection et des consultations réglementaires, et avant son passage en enquête publique, des mises à jour ont été apportées par l'Andra dans certaines pièces du dossier (déposé initialement le 16 janvier 2023).

Pour la clarté de l'information, l'Andra assure la traçabilité de ces mises à jour via les moyens suivants :

- des barres grises en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts en amont des consultations réglementaires ;
- un surlignage gris pour tracer les modifications ou ajouts depuis les consultations réglementaires ;
- des tableaux de traçabilité de ces mises à jour.

Les corrections mineures (orthographiques, de forme ou d'imprécision) ne sont pas matérialisées.

Sommaire

1. L'objet du résumé non technique 5

1.1 L'étude de maîtrise des risques : principes généraux et adaptations aux spécificités de Cigéo 6

1.2 Quelques notions préalables 9

1.2.1 La radioactivité 9

1.2.2 Notions de risque et de danger 11

2. L'INB Cigéo 13

2.1 Le principe du stockage en couche géologique profonde 14

2.2 Les phases temporelles de Cigéo 15

2.3 Les déchets destinés au stockage dans Cigéo 16

2.4 L'implantation de Cigéo, ses installations, le processus de stockage et le système de stockage après fermeture 18

2.4.1 L'implantation de Cigéo 18

2.4.2 Les principales installations de Cigéo 18

2.4.3 Le périmètre INB Cigéo 20

2.4.4 Le processus de stockage des colis de déchets radioactifs dans Cigéo 22

2.4.5 Le système de stockage après fermeture 23

3. La démarche retenue pour l'étude de maîtrise des risques 25

3.1 Les fonctions de sûreté après fermeture 29

3.2 Les fonctions de sûreté en exploitation 30

3.3 Les principes directeurs de la maîtrise des risques associés à Cigéo 31

3.3.1 La défense en profondeur 31

3.3.2 Les choix de conception 32

4. La maîtrise des risques après fermeture 33

4.1 L'analyse des risques et des incertitudes résiduelles 34

4.1.1 Panorama des risques internes au système de stockage 34

4.1.2 Panorama des risques d'origine externe 35

4.1.3 Panorama des incertitudes résiduelles 36

4.1.4 Panorama des perturbations éventuelles liées à la présence du stockage dans la couche du Callovo-oxfordien 37

4.1.5 Évolution à long terme des formations encaissantes et de l'hydrogéologie 38

4.2 Les scénarios d'évaluation de la sûreté après fermeture 40

4.2.1 Les « groupes de référence hypothétiques » 40

4.2.2 Les différents scénarios 41

4.3 L'évaluation quantitative des scénarios de sûreté après fermeture 43

4.3.1 Évaluation de la situation de référence du scénario d'évolution normale 43

4.3.2 Évaluation des autres situations et scénarios 43

4.4 Les enseignements de l'évaluation des scénarios 44

5. La maîtrise des risques en exploitation 45

5.1 Les principes et méthodologie 46

5.2 La prise en compte des retours d'expérience 47
5.3 L'inventaire des risques en exploitation et dispositions envisagées pour leur maîtrise 48
5.3.1 Risques internes nucléaires (liés à la présence des colis de déchets radioactifs) 48
5.3.2 Risques liés aux agressions internes 51
5.3.3 Risques liés aux agressions externes 56
5.3.4 Autres risques 58
5.4 L'analyse des conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement 60
5.4.1 L'évaluation de l'impact sur l'homme des situations accidentelles 60
5.4.2 Illustrations de situations accidentelles pendant l'exploitation avec leurs impacts potentiels 61
5.4.3 Illustration de situations accidentelles sévères et leurs impacts potentiels pendant l'exploitation 62
5.4.4 Situations accidentelles liées à la phase de construction initiale 63
5.5 Les systèmes de surveillance, moyens de secours et de gestion accidentelle 64
5.5.1 Systèmes de surveillance 64
5.5.2 Moyens de secours et de gestion accidentelle 65

Tableau de traçabilité des principales évolutions 67

Tables des illustrations 69

Références bibliographiques 71

1

L'objet du résumé non technique

1.1 L'étude de maîtrise des risques : principes généraux et adaptations aux spécificités de Cigéo 6
1.2 Quelques notions préalables 9

1.1 L'étude de maîtrise des risques : principes généraux et adaptations aux spécificités de Cigéo

Le présent résumé non technique a pour objectif de faciliter la prise de connaissance par le public de l'étude de maîtrise des risques, qui constitue une des pièces du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (INB[1]) Cigéo, dont l'Andra est le maître d'ouvrage.

Cigéo, comme toute installation nucléaire de base, comporte des risques susceptibles d'intervenir pendant sa construction et son exploitation, et comme toute installation de stockage de déchets radioactifs, la maîtrise des risques doit être assurée en après fermeture, sur de longues échelles de temps compte tenu de la durée du danger associé aux déchets radioactifs pour lesquels il est conçu.

UN OBJECTIF DE PROTECTION APRES FERMETURE

Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) dédié au stockage en formation géologique profonde définit les objectifs qui doivent être retenus, notamment pour la conception dudit stockage, et sa démonstration de sûreté précise 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* ».

Le guide n° 1 de l'ASN est disponible sur le site de l'ASNR[2].

L'étude de maîtrise des risques vise à démontrer que l'INB Cigéo présente un niveau de risque aussi bas de possible, compte tenu des connaissances et des meilleures techniques disponibles à ce jour. Pour cela, elle expose les risques identifiés pour Cigéo, présente leur analyse et les dispositions mises en œuvre pour prévenir et maîtriser ces risques, ainsi que les dispositions envisagées pour répondre à des éventuelles situations accidentelles, dans l'objectif unique de protection du personnel, du public et de l'environnement. Elle est rédigée afin d'être accessible au plus grand nombre, notamment en vue des consultations locales et pour la future enquête publique relative au dossier d'autorisation de création.

L'étude de risques effectuée par l'Andra consiste ainsi, comme pour toute analyse de ce type, à :

- inventorier les risques que présente Cigéo ;
- éviter et réduire ces risques ;
- surveiller l'installation pour être en mesure de détecter tout dysfonctionnement ;
- limiter les conséquences d'un éventuel dysfonctionnement.

Les risques analysés et présentés dans l'étude de maîtrise des risques peuvent être d'origine :

- nucléaires : directement liés à la présence des colis de déchets comme l'exposition à des rayonnements, dissémination de substances radioactives… ;
- internes : directement généré par la présence de composants ou des activités qui se déroulent au sein de l'installation ;
- externes, liés à des évènements naturels ou à des activités humaines extérieures.

[1] Les INB sont des installations qui, par leur nature ou en raison de la quantité ou de l'activité des substances radioactives qu'elles contiennent, sont soumises à des dispositions particulières en vue de protéger les personnes et l'environnement.

[2] https://www.asn.fr/l-asn-reglemente/guides-de-l-asn

L'étude de maîtrise des risques comporte deux analyses de risques menées de façon parallèle et coordonnée :

- une analyse dite « maîtrise des risques après fermeture », qui est une analyse spécifique au stockage de déchets radioactifs et qui est destinée à garantir la sûreté à long terme une fois l'installation de stockage fermée définitivement ;
- une analyse dite « maîtrise des risques en exploitation », qui est une analyse classique appliquée aux autres installations nucléaires de base, et qui vise également à s'assurer que les dispositions prises en exploitation n'entravent pas l'atteinte des objectifs de sûreté après-fermeture.

Pour évaluer les incidences des risques radiologiques, l'Andra établit des scénarios variés dans une logique d'évaluation de la robustesse du stockage en exploitation et en après fermeture. À titre illustratif, en lien avec la spécificité de Cigéo, l'Andra étudie pour l'après fermeture :

- un scénario d'évolution normale, qui représente l'évolution attendue du stockage dans le temps et dans l'espace, tel que conçu et en regard des connaissances scientifiques et technologiques ;
- des scénarios dits « d'évolution altérée » et « *what-if*[3] », qui permettent d'étudier les conséquences de dysfonctionnement de composants, peu et très peu vraisemblables, faisant sortir le stockage de son évolution normale ;
- des scénarios d'intrusion humaine involontaire (par exemple des forages) qui postulent un oubli du stockage.

L'évaluation quantitative des scénarios à l'aide d'un ensemble d'indicateurs permet de porter un jugement vis-à-vis des objectifs de protection de l'homme et de l'environnement, sur la bonne réalisation des fonctions de sûreté en évaluation normale ainsi que sur la robustesse d'ensemble du système de stockage en cas de non-réalisation d'une fonction.

UNE DEMARCHE DE SURETE COHERENTE AVEC LES PRATIQUES NATIONALES ET INTERNATIONALES

La démarche de sûreté retenue par l'Andra suit les textes relatifs à la sûreté émis par les organismes internationaux (Agence internationale de l'énergie atomique - AIEA, Agence pour l'énergie nucléaire l'énergie nucléaire -AEN, Commission internationale de protection radiologique - CIPR). Celles-ci fixent des principes et établissent des références communes à tous les responsables d'activités nucléaires. Afin de disposer d'une base éprouvée de connaissances, de méthodes et d'analyses ainsi que de partager les retours d'expériences, l'Andra est impliquée dans des coopérations internationales, notamment avec ses homologues étrangers.

L'Andra échange avec les exploitants nucléaires sur les référentiels et leur mise en œuvre. Elle fait également appel à des organismes aux compétences reconnues sur un vaste champ de domaines : géosciences (géologie, sédimentologie structurale, géomécanique, géochimie, tectonique/sismicité, hydrogéologie…), radiochimie, sciences des matériaux, sciences du climat, travaux souterrains, génie civil, génie nucléaire, mathématiques appliquées, simulation numérique, métrologie, radioprotection, sécurité incendie…

Enfin, plusieurs instructions, revues ou équivalents externes ont permis de vérifier la cohérence de la démarche menée par l'Andra avec ces pratiques nationales et internationales :

- depuis 1991, les différents dossiers liés au développement de 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 (2, 3)). Ces avis de l'ASN 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. L'ASNR 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 dans le Laboratoire souterrain ;

[3] Terminologie anglaise signifiant « Et si » communément retenue au plan national et international

- instaurée par la loi du 30 décembre 1991(4) puis celle de 2006(5), la Commission nationale d'évaluation (CNE) a pour mission d'évaluer la qualité des travaux scientifiques 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 générale les travaux de conception et d'évaluation de sûreté. La CNE rend compte annuellement à l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques (OPECST).

Afin de vérifier la cohérence de la démarche menée par l'Andra au regard des pratiques internationales, à la demande des ministères de tutelle de l'Andra, deux revues par des experts internationaux ont été organisées respectivement en 2002 et 2005 par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, et en 2016 par l'AIEA (les conclusions de ces revues sont disponibles en ligne[4]). Ainsi, souhaitant disposer du regard de pairs internationaux dans le cadre de l'instruction du dossier d'options de sûreté (DOS) du projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde Cigéo, l'ASN a demandé à l'AIEA d'organiser une revue internationale de ce dossier par des experts appartenant à des autorités de sûreté étrangères. À l'issue de cette revue et de l'instruction du dossier d'options de sureté par l'IRSN, l'ASN dans son avis du 11 janvier 2018 mentionne ainsi que « l'Andra a *retenu des principes globalement satisfaisants dans la démarche de sûreté en exploitation et après fermeture, cohérents avec le guide de sûreté de l'ASN de février 2008 susvisé et les travaux d'instances internationales* » (10).

Par ailleurs, l'étude de maîtrise des risques intègre le principe de réversibilité du stockage en couche géologique profonde et présente les dispositions prévues pour assurer ce caractère réversible[5] ainsi que le prescrit l'article R. 593-16 III, alinéa 3 en application de l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement.

LE PRINCIPE DE REVERSIBILITE

Cigéo est conçue pour offrir des choix aux générations futures en matière de gestion des déchets et pour ne pas les enfermer dans des choix de conception faits au lancement du projet. Le déploiement du stockage sera donc jalonné de décisions et d'autorisations de toutes natures, techniques ou politiques, de portée locale ou nationale, et qui seront soumises aux parties prenantes dans le cadre de la gouvernance de Cigéo. Prescrit par la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 (11), le principe de réversibilité est prévu à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement. Il se traduit par des dispositions visant à assurer :

- **la progressivité de la construction**, enchaînement prudent d'opérations de construction et de mises en service successives ;
- **la flexibilité du fonctionnement**, pour absorber des variations de son programme industriel ;
- **l'adaptabilité des installations** et la capacité à les modifier pour prendre en compte de nouvelles hypothèses de dimensionnement ;
- **la récupérabilité des colis**, à savoir la capacité à retirer du centre de stockage des colis qui y ont été stockés.

Le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (1) dédié au stockage en formation géologique profonde précise également que « *le stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs est le stockage de ces substances dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité* ». La réversibilité du stockage suppose des modes 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. Les dispositions prises en lien avec les volets de la réversibilité sont présentées dans le chapitre 6 de l'étude de maîtrise des risques.

---

[4] Les rapports des revues internationales sont disponibles aux adresses suivantes : revues menées sous l'égide de l'OCDE/AEN en 2001 (6), en 2005 (7), et en 2016 sous l'égide de l'AIEA (8, 9).

[5] Pour le stockage en couche géologique profonde, les quatre volets de la réversibilité en réponse au III de l'article R. 593-16 sont la progressivité, la flexibilité, l'adaptabilité et la récupérabilité.

1.2 Quelques notions préalables

1.2.1 La radioactivité

La radioactivité est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'univers lorsque les atomes se sont formés. Il s'agit du phénomène selon lequel certains atomes instables - les radionucléides - tendent à devenir stables. Pour ce faire, ils se désintègrent et expulsent alors de l'énergie sous forme de rayonnement et/ou de particules. La radioactivité peut aussi être créée artificiellement par des activités humaines. Cela consiste à créer ou recréer des noyaux radioactifs au moyen d'un accélérateur de particules ou d'un réacteur nucléaire.

La période radioactive désigne la durée au bout de laquelle une quantité d'un même radionucléide est divisée par deux, suite aux désintégrations qu'il a subies. Elle est très variable en fonction des radionucléides. À titre d'exemple, une quantité donnée de tritium se divise par deux en 12,3 ans, alors qu'il faut 5 700 ans pour le carbone 14.

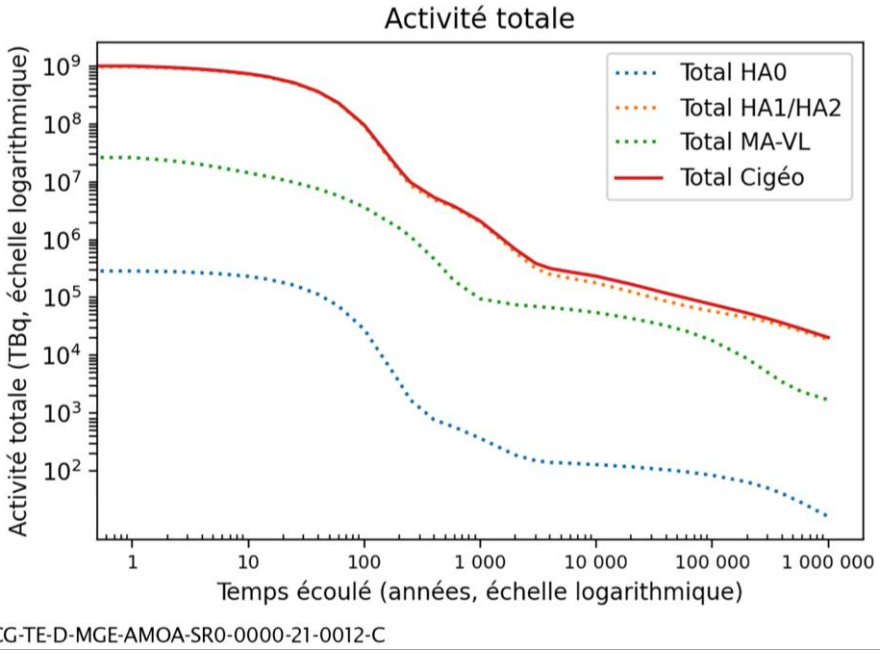


Figure 1-1 *Illustration de la décroissance dans le temps de la radioactivité totale des déchets de l'inventaire de référence de Cigéo (courbe rouge) et de la radioactivité de l'inventaire total des colis de déchets HA0, HA1/HA2 et MA-VL (courbes pointillées)*

Trois unités de mesure de la radioactivité sont fréquemment utilisées :

- l'unité internationale de mesure de la radioactivité est le becquerel (Bq). Il mesure l'activité (nombre de désintégrations par seconde) de la matière radioactive ;
- le gray (Gy) mesure la dose physiquement « absorbée » par la matière. Elle représente l'énergie absorbée par un kilogramme de matière exposé à un rayonnement ionisant apportant une énergie de 1 joule (1 Gy = 1 J.kg-1) ;
- le sievert permet d'évaluer les effets biologiques des rayonnements sur un organisme vivant exposé à la radioactivité. Ces effets varient en fonction de la nature des rayonnements et selon les organes exposés. L'unité la plus fréquemment employée est le millisievert (mSv), qui correspond à un millième de sievert.

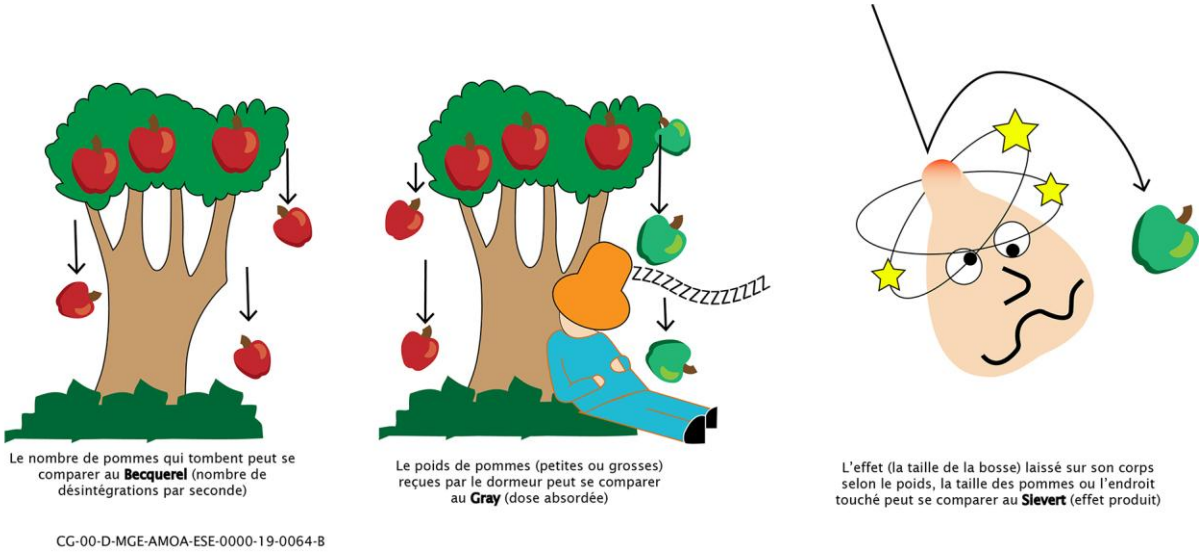


Figure 1-2 *Illustration de l'effet de la radioactivité, du becquerel (Bq) au sievert (Sv)*

Deux types d'exposition aux rayonnements ionisants sont possibles :

- l'irradiation, ou exposition externe, c'est-à-dire lorsqu'une personne se trouve exposée de l'extérieur à des rayonnements ionisants émis par une source radioactive située dans son voisinage. Dans ce cas, l'exposition cesse dès lors que la source de radioactivité est éloignée de la personne ou si un écran (blindage par exemple) est interposé entre la personne et la source ;
- la contamination, ou exposition interne, c'est-à-dire lorsque des éléments radioactifs ont pénétré à l'intérieur de l'organisme. Ceci peut se produire par inhalation des particules radioactives présentes dans l'air, par ingestion d'aliments contaminés par des particules radioactives, ou *via* un contact direct avec la peau ou une plaie (on parle dans ce cas de « contamination externe »). Lors d'une contamination, l'exposition aux particules radioactives se poursuit tant que la source est à l'intérieur ou au contact du corps.

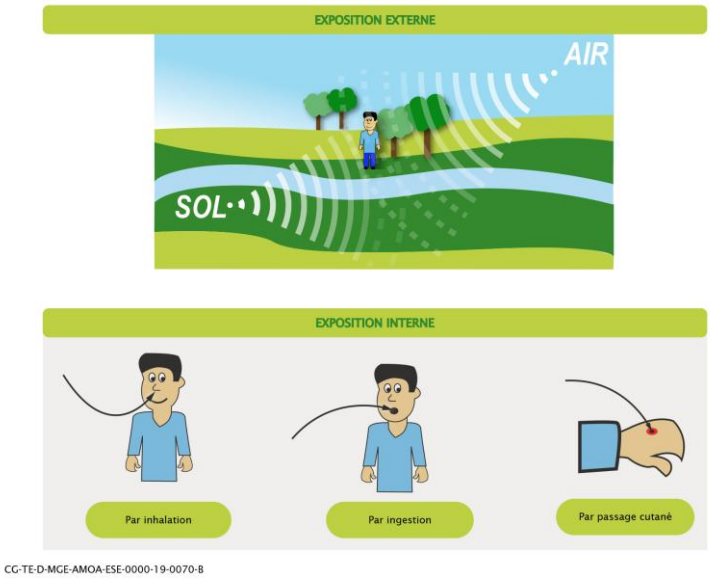


Figure 1-3 *Illustration des types d'exposition à la radioactivité*

1.2.2 Notions de risque et de danger

Selon la définition proposée par l'Ineris (12) , les notions de risque et de danger s'entendent par :

- risque : « Danger éventuel, plus ou moins prévisible, inhérent à une situation ou à une activité », « Éventualité d'un événement futur, incertain ou d'un terme indéterminé, ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage ». Le concept technique de risque s'appuie ainsi sur deux composantes principales : le danger et son potentiel d'effet sur les cibles ou enjeux exposés ;
- danger : propriété intrinsèque à une substance, à un système technique, à un organisme vivant qui est de nature à entraîner des dommages sur un élément vulnérable.

2

L'INB Cigéo

2.1 Le principe du stockage en couche géologique profonde 14
2.2 Les phases temporelles de Cigéo 15
2.3 Les déchets destinés au stockage dans Cigéo 16
2.4 L'implantation de Cigéo, ses installations, le processus de stockage et le système de stockage après fermeture 18

2.1 Le principe du stockage en couche géologique profonde

Le stockage en couche géologique profonde répond à l'objectif d'une gestion durable des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), telle que définie dans le code de l'environnement :

- éviter progressivement de mobiliser les générations futures pour gérer ces déchets qui resteront radioactifs très longtemps, grâce au caractère passif des dispositions de protection ;
- protéger durablement l'homme et l'environnement des risques générés par ces déchets radioactifs les plus dangereux, en les isolant et en limitant les transferts des radionucléides vers la surface.

Pour répondre à ces deux enjeux, le principe du stockage en couche géologique profonde est donc de placer les déchets radioactifs dans une couche géologique située à une profondeur suffisante (au moins 200 mètres) au cœur d'une couche dont les propriétés (épaisseur, perméabilité…) agissent en réduisant fortement sur la migration dans le temps des substances radioactives (par rétention, faible solubilité, faible déplacement dans l'eau par entraînement avec la circulation de l'eau ou par diffusion dans l'eau…), en tirant alors aussi profit de la décroissance radioactive.

Pour garantir la protection à long terme de l'homme et de l'environnement, l'Andra s'appuie sur plus de 20 ans de recherche et développement qui ont permis :

- l'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques, afin de comprendre les phénomènes physiques et chimiques et leur évolution sur de très longues durées. Cette acquisition a ainsi permis de réduire en tant que de besoin les incertitudes résiduelles au fur et à mesure du développement du projet Cigéo ;
- la conception du stockage, en lien avec l'état de ces connaissances scientifiques et technologiques. Cette conception tire notamment parti des propriétés favorables de la formation argileuse hôte du Callovo-Oxfordien, et contribue à une maîtrise du comportement du stockage en limitant notamment sa complexité et le poids des incertitudes résiduelles sur ce comportement ;
- la description et compréhension du comportement du stockage et de son environnement géologique dans le temps, notamment à long terme après la fermeture définitive du stockage ;
- l'évaluation de la sûreté en exploitation et après fermeture réalisée sur la base d'itérations connaissances/conception/sûreté.

2.2 Les phases temporelles de Cigéo

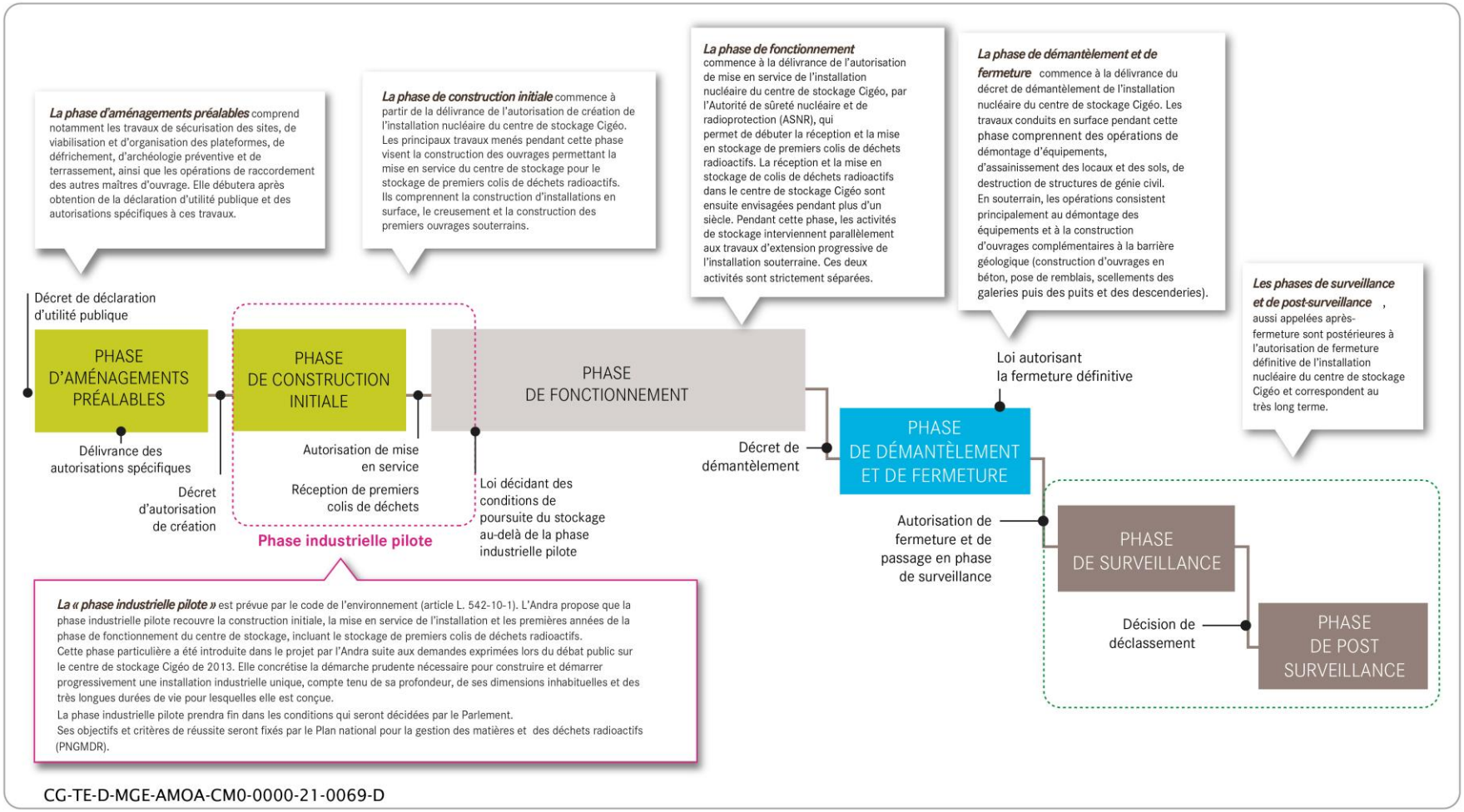


Figure 2-1 Phases temporelles de Cigéo

2.3 Les déchets destinés au stockage dans Cigéo

Les déchets radioactifs destinés au stockage dans Cigéo sont des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), issus principalement de l'industrie électronucléaire, mais aussi de la recherche et de la Défense nationale :

- les déchets HA sont essentiellement des résidus qui ont été extraits des combustibles nucléaires usés lors de leur retraitement (produits de fission et actinides mineurs), puis conditionnés dans une matrice de verre (processus de vitrification) ;
- les déchets MA-VL sont principalement des déchets de structures métalliques entourant les combustibles (coques et embouts), issus du retraitement du combustible usé et, 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 et des déchets activés ayant séjourné dans les réacteurs nucléaires.

L'inventaire de référence pour lequel Cigéo est conçu comprend les déchets HA et MA-VL déjà produits et ceux qui seront produits à l'avenir par les installations nucléaires existantes et par celles dont la création a été autorisée à fin 2016 (EPR de Flamanville, réacteur de fusion ITER, réacteur expérimental Jules Horowitz), jusqu'au terme prévisible de leur fonctionnement, puis de leur démantèlement. Aujourd'hui, environ 50 % des déchets HA et MA-VL sont déjà produits.

Le volume des déchets radioactifs de l'inventaire de référence est de l'ordre de 83 000 m³. Il correspond à environ 225 000 colis à stocker.

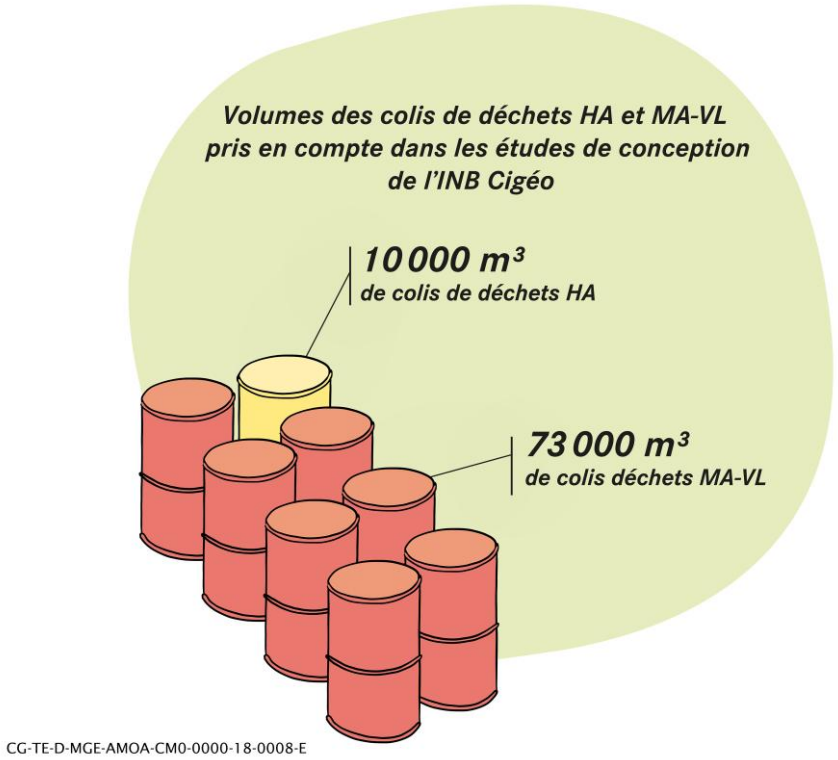


Figure 2-2 *Volumes des colis de déchets HA et MA-VL pris en compte dans les études de conception de Cigéo*

L'Andra conçoit Cigéo de façon qu'il puisse évoluer au fur et à mesure de sa construction par tranches successives pour prendre en compte d'éventuelles évolutions de l'inventaire des déchets stockés, en lien notamment avec les stratégies nationales énergétiques, ou à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets. À ce stade, ces évolutions sont étudiées au travers d'un inventaire de réserve et d'études d'adaptabilité.

Le niveau de radioactivité des déchets HA et MA-VL leur confère une forte dangerosité radiologique et des risques associés :

- des risques d'irradiation externe (ou exposition externe) :
  - ✓ 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 ;
  - ✓ par leurs natures et leurs concentrations nettement plus faibles en radionucléides, les déchets radioactifs MA-VL sont en général moins irradiants.
- des risques de contamination (ou exposition interne), en cas par exemple d'inhalation de 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.

Compte tenu de cette forte dangerosité et de la très longue durée pendant laquelle elle perdure, les déchets HA et MA-VL ne peuvent pas être conservés durablement en surface ou à proximité de la surface du sol de façon sûre, pérenne et sans intervention humaine.

LES COLIS PRIMAIRES DE DÉCHETS RADIOACTIFS

- l'ensemble des déchets radioactifs reçus sur Cigéo se présente 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 radionucléides et les substances toxiques chimiques en leur sein ;
- les colis primaires doivent respecter les spécifications d'acceptation des colis mentionnées à l'article L. 542-12 4° du code de l'environnement, dont la version préliminaire est présentée dans la « Pièce 19 – Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis » citée en référence (13).

LES SPECIFICATIONS D'ACCEPTATION DES COLIS

Les spécifications d'acceptation des colis mentionnées à l'article L. 542-12 du code de l'environnement définissent les critères qu'un colis de déchets radioactifs doit respecter pour être accepté dans Cigéo (13). Elles portent sur les caractéristiques et propriétés radiologiques, physiques, mécaniques et chimiques des colis. Leur établissement résulte de la mise en œuvre d'une démarche qui relie la connaissance des colis de déchets radioactifs, la conception et la démonstration de sûreté de l'installation nucléaire de base Cigéo pendant son fonctionnement et après sa fermeture.

LA SURVEILLANCE DES COLIS EXERCÉE PAR L'ANDRA

La surveillance des colis contribue à la maîtrise de la qualité des colis qui seront reçus sur Cigéo. Ses objectifs sont de vérifier la mise en œuvre par le producteur des dispositions décrites dans ses référentiels de conditionnement et d'entreposage et de vérifier la conformité des colis aux critères des spécifications d'acceptation des colis.

2.4 L'implantation de Cigéo, ses installations, le processus de stockage et le système de stockage après fermeture

2.4.1 L'implantation de Cigéo

Cigéo est situé dans la région Grand Est, à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne. Ses installations sont implantées sur les communes de Bonnet, Bure, Cirfontaines-en-Ornois, Gillaumé, Gondrecourt-le-Château, Houdelaincourt, Horville-en-Ornois, Mandres-en-Barrois, Ribeaucourt, Saint-Joire et Saudron.

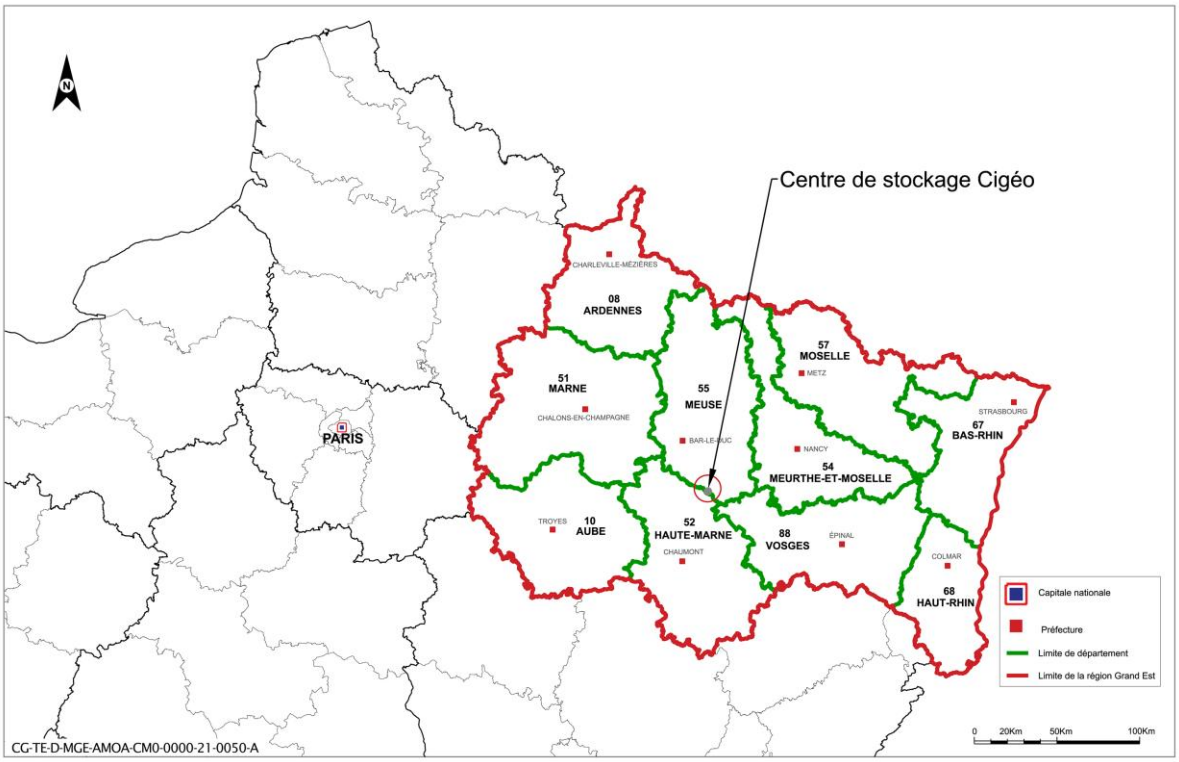


Figure 2-3 Localisation dans l'est de la France de Cigéo

2.4.2 Les principales installations de Cigéo

Cigéo comprend des installations situées 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 des ouvrages ;
- 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.

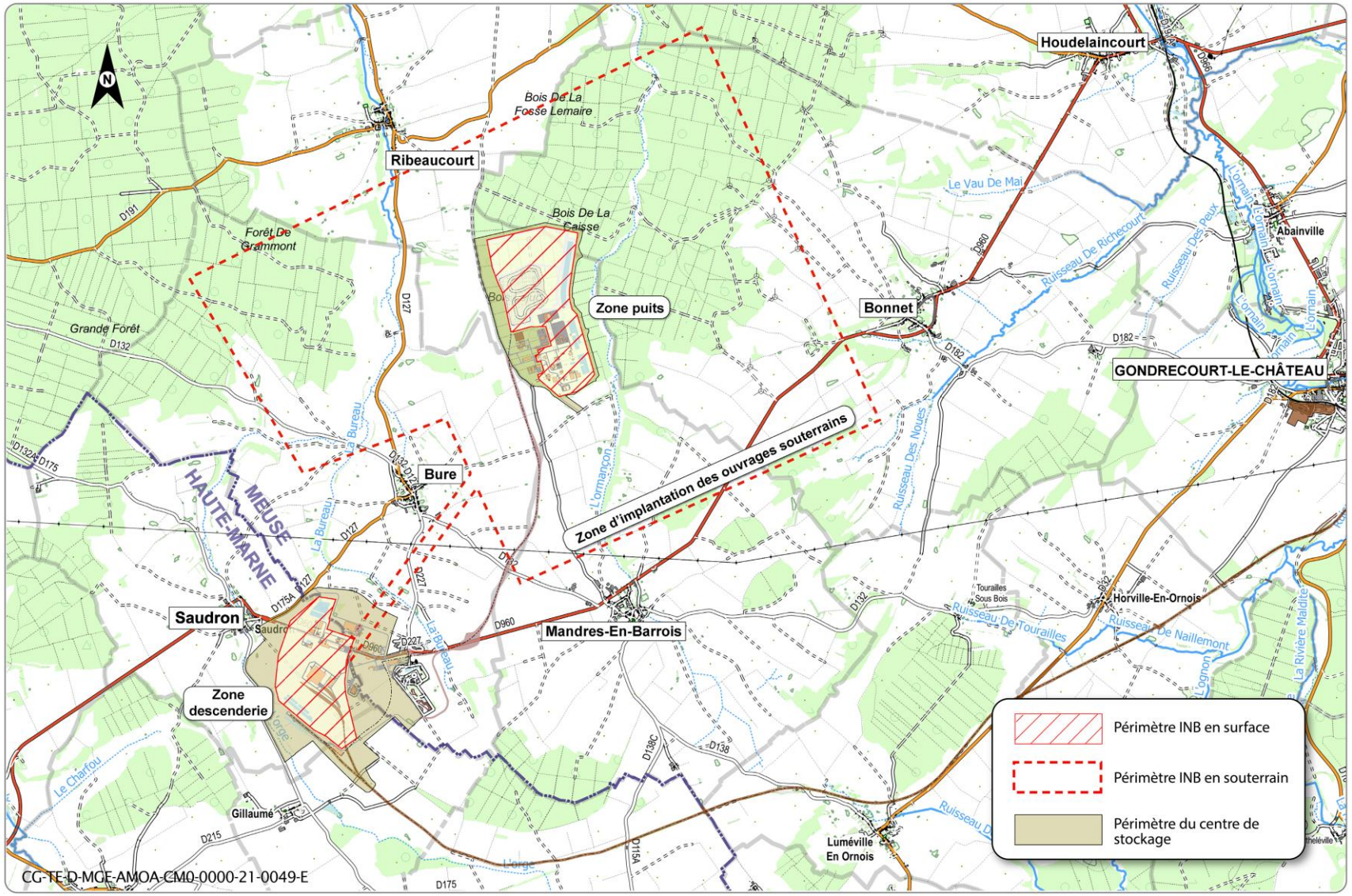


Figure 2-4 *Localisation des installations de surface de Cigéo*

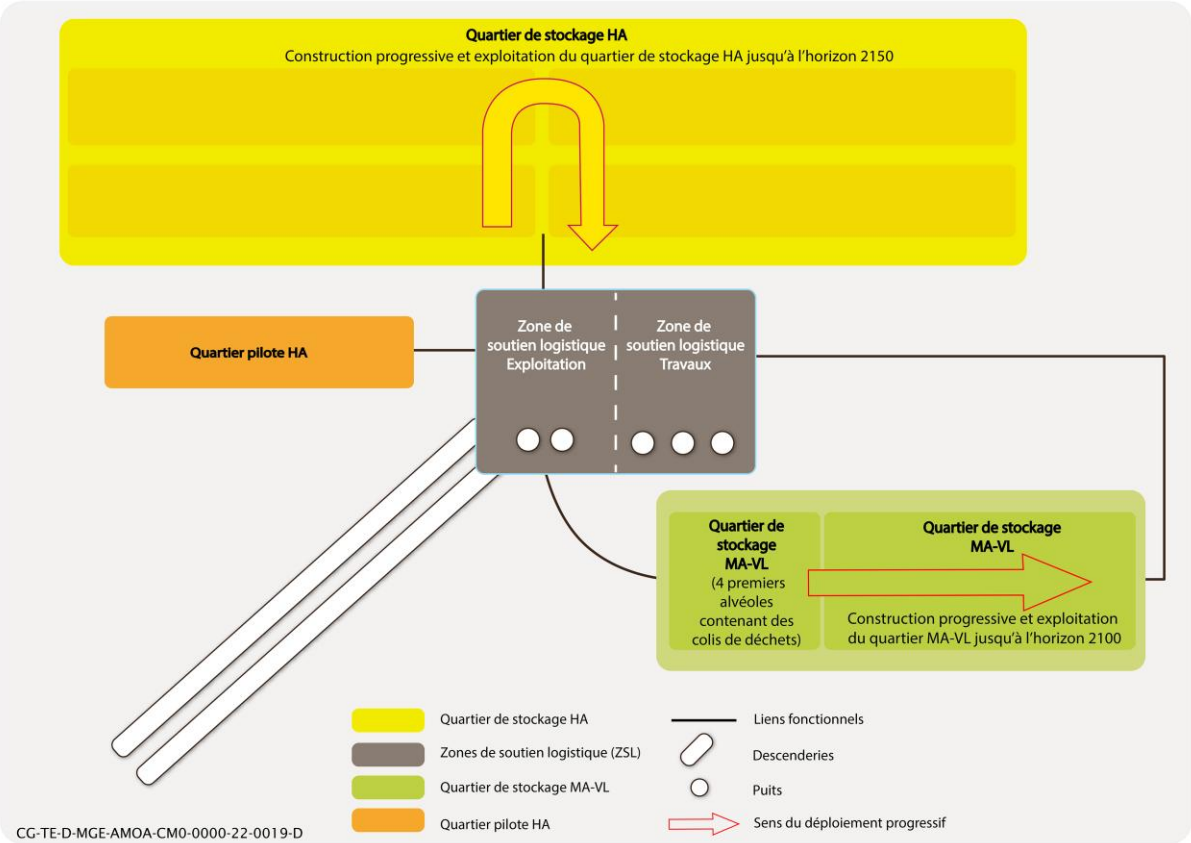


Figure 2-5 *Représentation schématique des ouvrages souterrains de Cigéo et de leur déploiement dans le temps*

2.4.3 Le périmètre INB Cigéo

Le périmètre de l'installation nucléaire de base proposé dans le présent dossier de demande d'autorisation de création est représenté schématiquement dans la figure ci-après. Conformément à l'article R. 593-16 du code de l'environnement, la « Pièce 4 - Plans de situation au 1/10 000e indiquant le périmètre proposé » (14) présente le plan de l'installation à l'échelle de 1/2 500e au minimum.

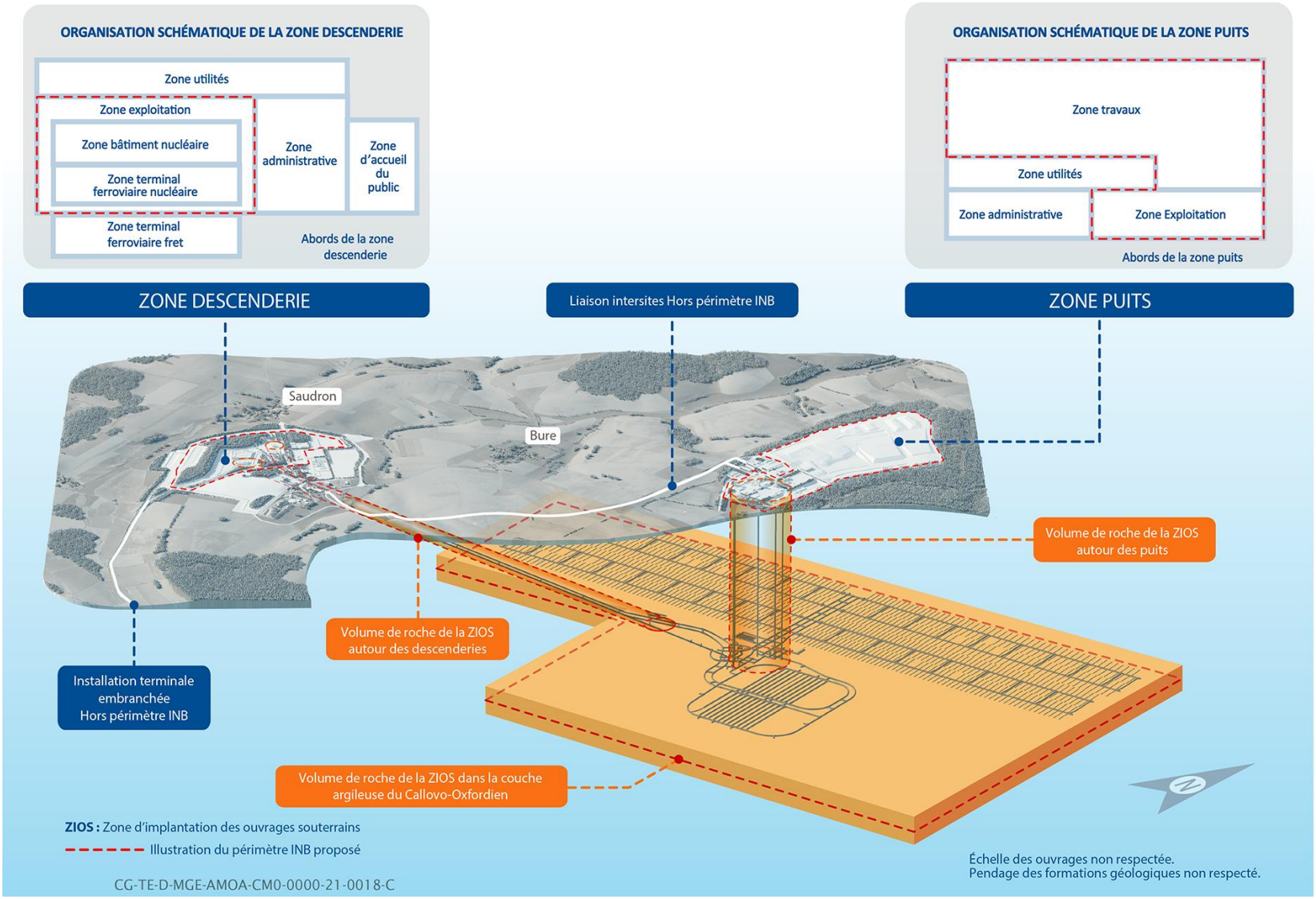


Figure 2-6 Représentation schématique du périmètre INB Cigéo

2.4.4 Le processus de stockage des colis de déchets radioactifs dans Cigéo

Les différentes opérations prévues sur les colis de déchets, comprennent des opérations de réception en surface, de préparation des colis de déchets, de mise en place des colis dans des hottes avant leur transfert en souterrain et la mise en place des colis dans les alvéoles de stockage qui leur sont destinés.

Le cheminement de ces opérations selon un processus continu est synthétisé ci-dessous :

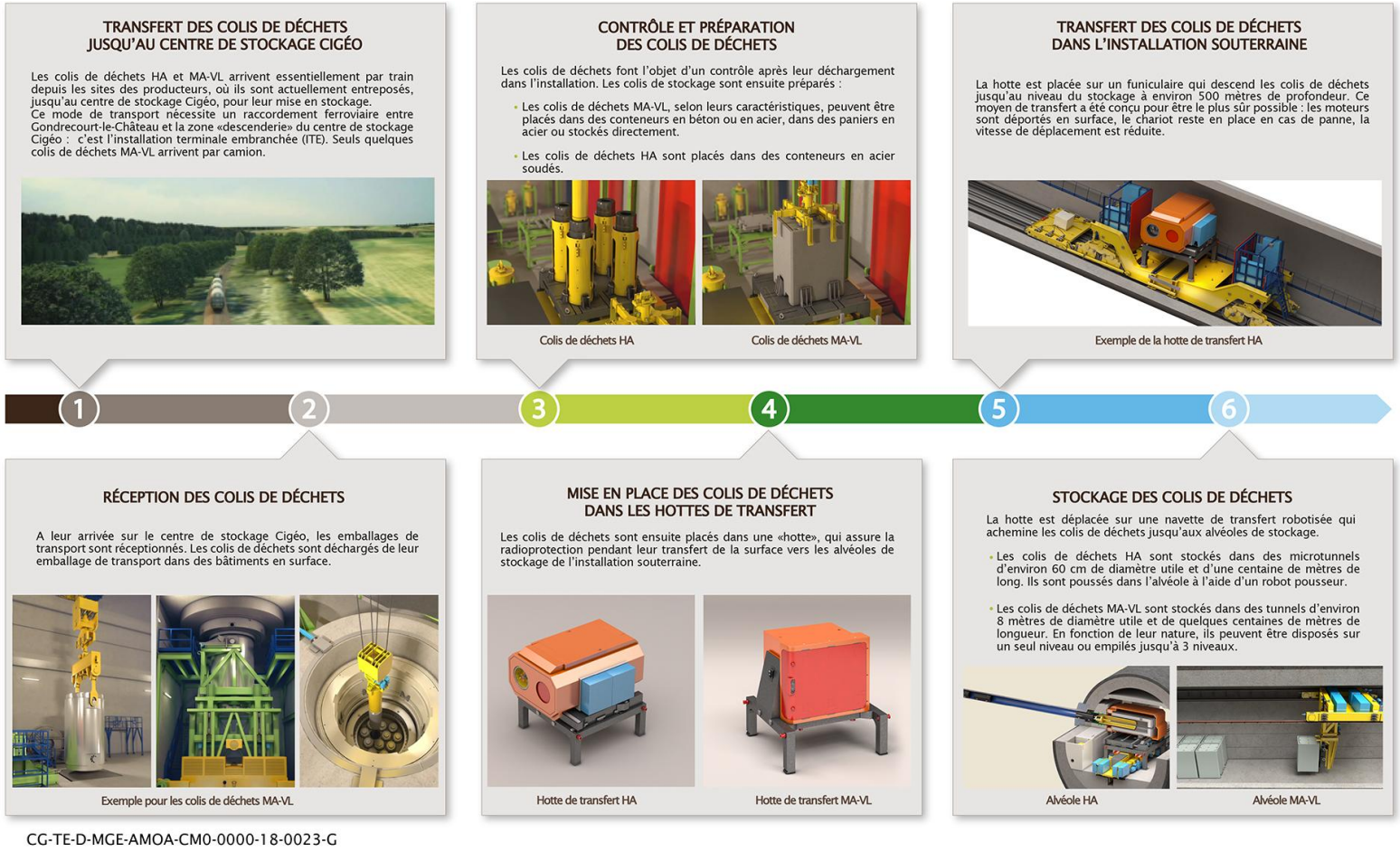


Figure 2-7 Cheminement des colis de déchets de leur arrivée à Cigéo jusqu'à leur emplacement de stockage

2.4.5 Le système de stockage après fermeture

La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental assigné au stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde**.** À la fin de l'exploitation de Cigéo, celui-ci devra être fermé. Après fermeture, la sûreté est ainsi assurée de façon passive : c'est-à-dire que les personnes et l'environnement sont protégés des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

Cette fermeture de Cigéo ne pourra être autorisée que par une loi votée par le Parlement. Les installations de surface des zones descenderies et puits seront démantelées et l'ensemble de l'installation souterraine sera remblayé et scellé par des scellements mis en place dans des galeries et dans les liaisons entre la surface et les zones de stockage (cf. « Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance » (15)).

Le principe du 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 et substances toxiques contenus dans les déchets. Il comprend trois grandes catégories de composants :

- la couche du Callovo-Oxfordien, formation géologique dans laquelle sont implantées les zones de stockage, et composant central vis-à-vis de la sûreté après fermeture ;
- les ouvrages de fermeture de l'installation souterraine qui sont de deux types :
  - ✓ des « scellements » qui correspondent à des ouvrages de faible perméabilité implantés dans des galeries et les liaisons surface-fond. Ces scellements ont comme objectif de s'opposer à la circulation d'eau dans le stockage pour éviter qu'elle ne constitue un facteur d'altération des déchets et un vecteur de migration des radionucléides ;
  - ✓ des remblais qui ont pour but de limiter les déformations à long terme de la couche du Callovo-Oxfordien à proximité des ouvrages, afin d'en préserver les caractéristiques favorables.
- l'installation souterraine remblayée et scellée, qui, par sa conception, tire parti des propriétés favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et contribue à les préserver.

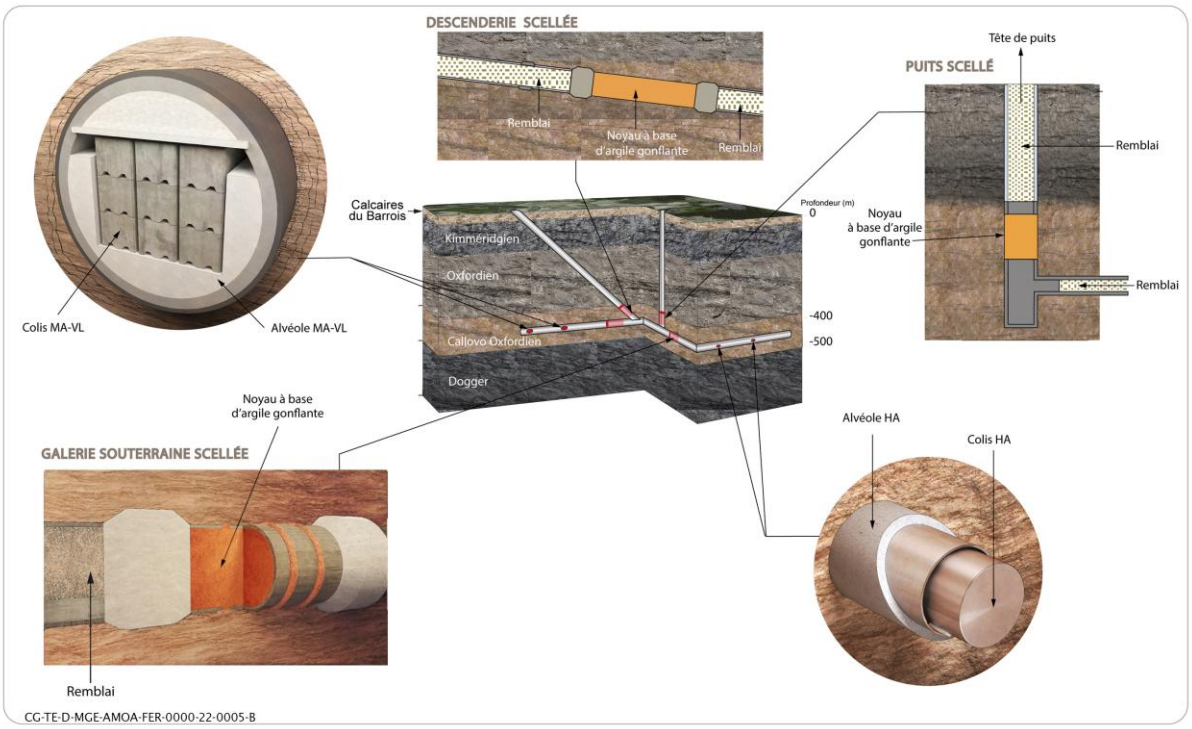


Figure 2-8 *Illustration de l'installation souterraine de Cigéo après fermeture (c'est-à-dire une fois remblayée et scellée, sous réserve de l'autorisation de sa fermeture par une loi)*

3

La démarche retenue pour l'étude de maîtrise des risques

3.1 Les fonctions de sûreté après fermeture 29
3.2 Les fonctions de sûreté en exploitation 30
3.3 Les principes directeurs de la maîtrise des risques associés à Cigéo 31

En lien avec l'objectif fondamental de protection de l'homme et l'environnement du danger que représentent les déchets les plus radioactifs et à vie longue, Cigéo est une installation nucléaire particulière qui a vocation, une fois créée, à perdurer au-delà de son exploitation. L'étude des risques qui y sont associés est donc elle aussi particulière puisqu'elle s'attache à identifier et analyser en parallèle les risques en exploitation et ceux après fermeture sur le long terme.

Pour cela, deux analyses de risques sont menées de manière parallèle et coordonnée :

- **une analyse dite « maîtrise des risques après fermeture »,** analyse propre au stockage de déchets radioactifs et destinée à garantir la sûreté à long terme une fois l'installation de stockage fermée définitivement ;
- **une analyse dite « maîtrise des risques en exploitation »,** analyse classique appliquée aux autres installations nucléaires, et qui vise également à s'assurer que les dispositions prises en exploitation n'entravent pas l'atteinte des objectifs de sûreté après-fermeture.

Cette démarche intégrée permet à chaque étape d'évaluer la robustesse de Cigéo, au travers des composants du stockage pris dans leur ensemble ou séparément, et des fonctions de sûreté qu'ils assurent.

QU'EST-CE QUE LA ROBUSTESSE ?

La robustesse est la capacité d'un équipement, d'un composant ou d'un système à fonctionner dans une gamme élargie de conditions d'environnement (chaleur, froid, eau liquide, humidité, sécheresse, vibration, déformations géométriques, présence de contamination, vieillissement, après un choc…) ou à être tolérant à la défaillance de ses composants ou aux agressions externes.

La figure ci-après synthétise les différentes étapes de la démarche appliquée à Cigéo pour l'étude de maîtrise des risques.

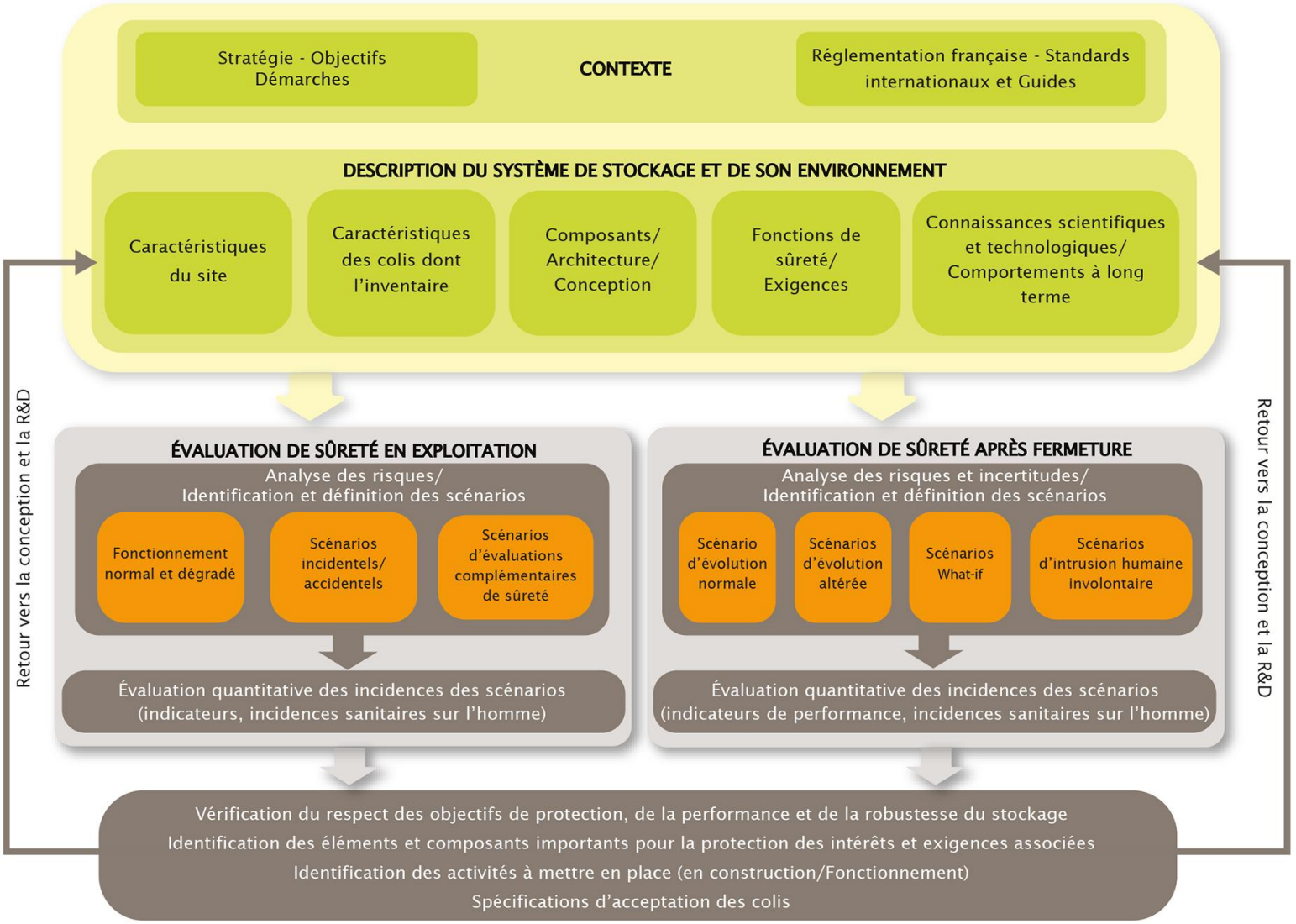


Figure 3-1 *Schéma illustrant la démarche de sûreté générale appliquée à Cigéo*

L'analyse de la maîtrise des risques associés à Cigéo repose sur un socle de connaissances important qui regroupe :

- la **connaissance des colis de déchets radioactifs à stocker**. Fournie par les producteurs de déchets et analysées par l'Andra, elle participe à la sûreté de l'installation de stockage en exploitation ainsi qu'autant que nécessaire à la sûreté du stockage après fermeture : origine, procédés de conditionnement, hypothèses de conditionnement lorsque le conditionnement est à définir, propriétés physico-chimiques et radiologiques ;
- la **connaissance du site et de la couche géologique retenus pour l'implantation du stockage**. L'ensemble des travaux de caractérisation du site d'implantation et de la couche (forages, sismique 2D/3D, Laboratoire de recherche souterrain du centre de Meuse/Haute-Marne) a permis à l'Andra de s'assurer que le milieu géologique présente les propriétés attendues notamment au regard des critères de choix de site du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (profondeur de la formation hôte, stabilité, hydrogéologie…) ;
- la **connaissance de l'évolution du système de stockage après sa fermeture**. Apporter la démonstration de la sûreté du stockage après fermeture implique la compréhension de l'évolution des composants naturels et ouvragés qui constituent le système de stockage après sa fermeture ainsi que leurs éventuelles interactions, et du système dans son ensemble. La description de l'évolution du stockage a pour objectif d'apporter une compréhension aussi robuste que possible de « l'histoire future » du stockage, sans prétendre à une prédiction, notamment sur son évolution thermique, hydraulique, mécanique, chimique.

LES CARACTERISTIQUES FAVORABLES DE LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN POUR UN STOCKAGE GEOLOGIQUE PROFOND

Les données acquises depuis plus de 20 ans par les études et recherches conduites sur et dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien montrent qu'elle présente des caractéristiques favorables qui permettent de garantir la protection de l'homme et de l'environnement sur le long terme.

Située dans le Bassin parisien, cette couche est située dans une zone reconnue comme stable depuis environ 160 millions d'années et quasi sans sismicité. Elle est localisée à une profondeur d'environ 500 mètres, soit bien supérieure à celle de l'érosion possible à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années (estimée 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.

La géométrie de la couche du Callovo-Oxfordien (couche à faible pendage, environ 1,5 degré), son épaisseur importante (environ de 140 mètres à 160 mètres sur le site d'implantation) et sa très faible variabilité de ses propriétés sur *a minima* plusieurs dizaines de kilomètres carrés permettent d'y accueillir les ouvrages de stockage et d'y ménager au-dessus et en dessous des épaisseurs importantes de la couche du Callovo-Oxfordien (d'au moins 50 mètres).

L'ensemble des propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien est très favorable : ses caractéristiques hydrauliques, en particulier sa très faible perméabilité, limitent les circulations d'eau ; ses caractéristiques physico-chimiques favorisent la rétention et la faible solubilité de la majorité des radionucléides et substances toxiques chimiques, et de manière générale leur très faible migration dans le temps.

Associée à ces propriétés, l'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien contribue à retarder, limiter et atténuer la quantité de radionucléides et substances toxiques chimiques relâchée par les colis de déchets, qui migrerait potentiellement depuis le stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien, puis hors de cette dernière vers l'environnement.

3.1 Les fonctions de sûreté après fermeture

La première fonction de sûreté après fermeture consiste à isoler les déchets des phénomènes de surface et des activités humaines. Cette fonction se traduit dans les éléments de conception suivants :

- implanter les galeries et ouvrages de stockage en profondeur, dans la couche du Callovo-Oxfordien, suffisamment à l'écart des phénomènes naturels de surface (en particulier l'érosion), et éloignés des zones présentant des ressources souterraines exceptionnelles ou particulières (notamment pour limiter l'intrusion par forage) ;
- maintenir des dispositifs de mémoire du stockage le plus longtemps possible après la fermeture (au moins 500 ans).

La deuxième fonction de sûreté après fermeture consiste à limiter le transfert jusqu'à l'homme et l'environnement des radionucléides et substances toxiques chimiques contenus dans les déchets, en faisant en sorte de contraindre et ralentir au maximum la migration d'une partie de ces éléments jusqu'à la surface afin de bénéficier de la décroissance radioactive des radionucléides. Cette fonction se traduit dans les éléments de conception suivants :

- s'opposer à la circulation d'eau : implantation des ouvrages dans la couche Callovo-Oxfordien dans laquelle les écoulements d'eau sont faibles du fait de sa faible perméabilité, architecture comprenant des quartiers de stockage « borgnes », mise en place de scellements dans les descenderies/puits limitant les écoulements d'eau dans les ouvrages souterrains… ;
- limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans l'alvéole : matériaux utilisés pour la conception des conteneurs de stockage (par exemple le conteneur de stockage en acier des colis de stockage de déchets HA dont l'étanchéité pendant une période donnée évite l'arrivée d'eau sur les colis de déchets HA), conditions physico-chimiques dans les alvéoles… ;
- retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques : implantation des quartiers de stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien pour tirer parti de son épaisseur (architecture de type planaire, longueurs des alvéoles de stockage et des galeries souterraines…) ;
- préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté après fermeture : choix de matériaux compatibles avec les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien, dimensionnement thermique, thermohydraulique et mécanique des quartiers de stockage, orientation des alvéoles de stockage, limitation des vides dans les alvéoles de stockage…

EFFETS DE LA DECROISSANCE ET DE LA MIGRATION DES RADIONUCLEIDES DANS LA COUCHE DU CALLOVO-OXFORDIEN

Le processus de diffusion se traduit par un flux de radionucléides (*i.e.* Quantité par unité de temps) à une distance donnée qui croît dans le temps, passe par un maximum puis décroît. Le temps d'atteinte du maximum et la valeur du flux maximum sont fonction de la distance à la source et du comportement du radionucléide dans le milieu : plus la distance à la source est grande, ou plus le milieu poreux présente une capacité de rétention du radionucléide, ou plus la capacité diffusion du milieu poreux est faible, plus le temps d'atteinte du maximum est grand et la valeur du flux maximum faible. En fonction du temps d'atteinte du maximum de flux en regard de la période du radionucléide, la décroissance radioactive peut contribuer plus encore à diminuer la valeur du maximum de flux.

La figure ci-après illustre les effets de la décroissance et de la rétention dans la migration d'un radionucléide par diffusion dans un milieu poreux donné, par exemple la couche du Callovo-Oxfordien, à une distance donnée d'une source du radionucléide.

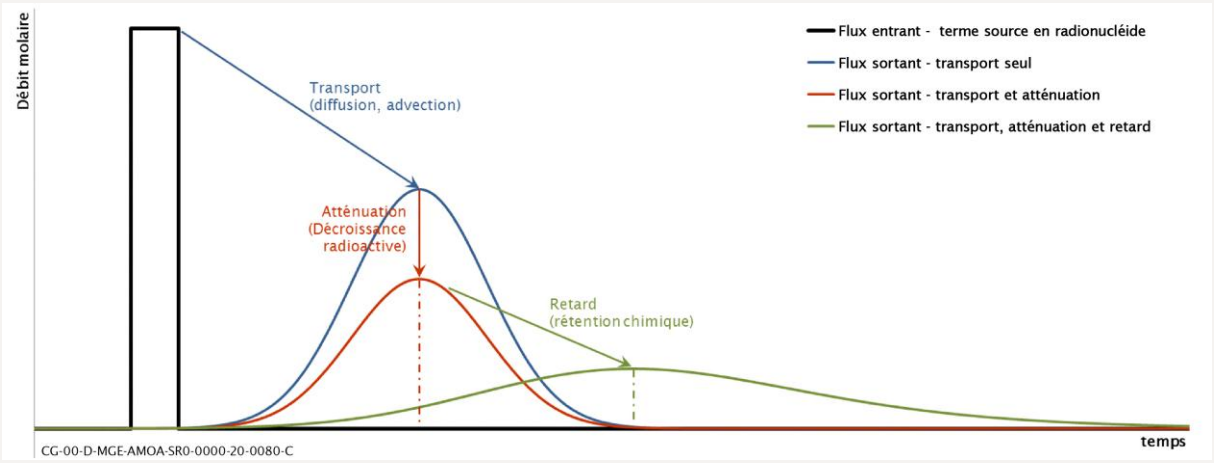


Figure 3-2 *Schéma illustrant les processus de décroissance, d'atténuation et de retard d'un radionucléide mis en jeu lors de sa migration par diffusion dans le temps à une distance donnée d'une source (flux du radionucléide arrivant à une distance donnée d'une source du radionucléide représentée ici par une quantité relâchée de manière constante dans un intervalle de temps donné)*

C'est ce qu'il se passe dans la couche du Callovo-Oxfordien et fonde sa capacité à accueillir un stockage de déchets radioactifs : la source potentielle de radionucléides est le stockage et le milieu poreux est la couche du Callovo-Oxfordien. Ce dernier présente une forte capacité de rétention de la majorité des radionucléides contenus dans les déchets radioactifs, sa capacité de diffusion est très faible et son épaisseur est grande (entre environ 140 m et 160 m, soit au moins 50 m à 60 m de part et d'autre du stockage), de sorte que la majorité des radionucléides migre très peu par diffusion dans la couche du Callovo-Oxfordien et reste confinée dans les alvéoles de stockage ou dans le Callovo-Oxfordien en champ proche des alvéoles. Les quelques radionucléides mobiles (sans rétention) et à durée de vie longue qui peuvent migrer par diffusion, comme le Chlore 36 ou l'Iode 129, le font très lentement dans la couche du Callovo-Oxfordien, d'où des temps d'atteinte des maximas de flux totaux aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien de plusieurs centaines de milliers d'années et des flux totaux de radionucléide très faibles.

3.2 Les fonctions de sûreté en exploitation

Pour Cigéo, comme pour toute installation nucléaire en France, la réglementation précise les quatre fonctions de sûreté suivantes à prendre en considération :

- la maîtrise des réactions nucléaires en chaîne ; appelée couramment « risque de 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, l'Andra ajoute une fonction supplémentaire liée aux spécificités de Cigéo : la fonction d'évacuation des gaz qui sont formés par radiolyse[6] et par corrosion.

[6] La radiolyse est la décomposition de la matière (solide, liquide ou gazeuse) par des rayonnements ionisants. L'eau peut être radiolysée, mais également des gaz, des sels minéraux et de nombreuses molécules organiques. Elle génère potentiellement l'apparition de gaz comme l'hydrogène (H_2), le dioxyde de carbone (CO_2), ou le monoxyde de carbone (CO).

3.3 Les principes directeurs de la maîtrise des risques associés à Cigéo

3.3.1 La défense en profondeur

Le principe de défense en profondeur pour les installations nucléaires de base conduit à la mise en place de lignes de défense successives, chacune pouvant intervenir après la défaillance de la précédente. Elles sont 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 après fermeture, la sûreté du stockage en couche géologique repose sur des dispositifs passifs sans besoin d'intervention humaine. 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 une redondance de fonctions de sûreté de telle sorte que des défaillances plausibles de composants ne compromettent pas la sûreté de l'installation. L'application du principe de défense en profondeur se traduit par :

- l'attribution de fonctions de sûreté aux composants naturels (le site et en particulier la roche hôte) et aux composants ouvragés (préservation des caractéristiques de la roche hôte) ;
- la mise en place d'activités de surveillance dès la construction du stockage, puis pendant l'exploitation de l'INB, pour le suivi des composants naturels et ouvragés assurant des fonctions de sûreté après fermeture ;
- la définition de scénarios pour s'assurer de la robustesse du système de stockage dans son ensemble face à une défaillance ou une déviation par rapport à l'évolution attendue du système de stockage et l'apport de chaque composant à cette robustesse, et permettre d'évaluer si les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement sont atteints.

En exploitation, le principe de défense en profondeur vise à se prémunir des défaillances grâce à la mise en place de lignes de défenses (ou barrières) successives. Il consiste à interposer entre la source de danger et les travailleurs, le public ou l'environnement, un nombre suffisant de dispositions techniques et organisationnelles afin 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. Les niveaux de défense en profondeur s'organisent en quatre niveaux :

- la prévention, visant à éviter l'apparition des défaillances ;
- la surveillance, afin de détecter 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 maîtrisés afin de limiter les conséquences sur les personnes et l'environnement.

3.3.2 Les choix de conception

Les choix de conception interviennent également dans la maîtrise de la sûreté de l'installation, à court et à long termes. Ces choix sont guidés par :

3.3.2.1 La maîtrise des risques liés à la présence de colis de déchets radioactifs et à leur manutention

Les colis de déchets confinent la radioactivité et sont des éléments à protéger. Les solutions technologiques lors de leur manutention (opérations de transfert, mise en stockage) sont choisies en conséquence (par exemple limitation des hauteurs de manipulation et donc de chute des colis). Une fois stockés, les colis sont maintenus dans des conditions favorables pour qu'ils assurent le confinement de la radioactivité.

3.3.2.2 La maîtrise des risques de relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques hors des colis de déchets radioactifs et leur migration éventuelle vers la surface

La sûreté du stockage après fermeture repose sur la couche du Callovo-Oxfordien et les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond qui viennent en complément. 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 radionucléides et des substances toxiques chimiques vers la surface. Compte tenu du rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien, la conception de l'architecture des ouvrages souterrains, et des scellements, vise également à préserver ses caractéristiques très favorables, en limitant les perturbations apportées par les colis (radioactivité, chaleur…), et par les ouvrages (par exemple en orientant les alvéoles de stockage selon une direction favorisant la préservation d'une « garde » de Callovo-Oxfordien non endommagée mécaniquement) la plus grande possible de part et d'autre).

En complément, les solutions technologiques retenues pour la conception sont aussi standards que possible et éprouvées, notamment par des essais technologiques conduits dans Laboratoire souterrain ou d'autres domaines que le stockage (par exemple les travaux souterrains pour le creusement des puits, descenderies, galeries et alvéole de stockage).

4

La maîtrise des risques après fermeture

4.1 L'analyse des risques et des incertitudes résiduelles 34
4.2 Les scénarios d'évaluation de la sûreté après fermeture 40
4.3 L'évaluation quantitative des scénarios de sûreté après fermeture 43
4.4 Les enseignements de l'évaluation des scénarios 44

L'analyse après fermeture s'organise selon les étapes clés :

- analyse dite des risques et incertitudes résiduelles, qui s'appuie sur l'examen des éventuelles perturbations sur le comportement de la couche de Callovo-Oxfordien liées à la présence du stockage de déchets radioactifs (thermique, hydraulique, mécanique, chimique), des évènements naturels et activités humaines (en cas d'oubli du stockage) qui pourraient survenir, et sur l'état des connaissances scientifiques et technologiques ;
- identification puis définition de scénarios dits « scénarios de sûreté après fermeture » pour représenter la manière dont les radionucléides contenus dans les déchets sont susceptibles d'arriver jusqu'à l'homme, afin de vérifier la capacité du système de stockage à garantir la protection de l'homme et de l'environnement sur le long terme, et s'assurer de la robustesse de cette capacité face à des dysfonctionnements ou des déviations par rapport à l'évolution attendue du système de stockage ;
- évaluation quantitative de ces scénarios (quantification d'indicateurs de la capacité du système de stockage à garantir la protection de l'homme et de l'environnement sur le long terme, par exemple des bilans de quantité de radionucléides à un temps donné entre les différents composants du système de stockage par rapport aux inventaires initiaux des radionucléides dans les colis de déchets stockés, ou des doses à l'homme à des exutoires) ;
- enseignements issus de ces évaluations, pour les itérations connaissances/conception/sûreté suivantes.

4.1 L'analyse des risques et des incertitudes résiduelles

4.1.1 Panorama des risques internes au système de stockage

Après la fermeture du stockage, des risques peuvent provenir de perturbations d'origine interne au système de stockage et de leurs éventuelles interactions. Des choix de conception ont été pris pour limiter ces risques internes.

4.1.1.1 Perturbations thermiques

Les colis de déchets HA se caractérisent par un dégagement de chaleur qui peut altérer le comportement des composants du stockage, en particulier la couche du Callovo-Oxfordien.

Les perturbations engendrées par ce dégagement de chaleur sont gérées par la limitation de la température dans la couche de Callovo-Oxfordien en prenant des dispositions de conception (par exemple : distance entre alvéoles de stockage HA, éloignement des zones de stockage HA et des zones de stockage MA-VL afin de limiter toute interaction thermique entre alvéoles/zones) ;

4.1.1.2 Perturbations chimiques

Du fait de leur composition chimique et de leur dégradation progressive dans le temps, les colis de déchets, et notamment certains colis MA-VL, peuvent engendrer des perturbations chimiques du milieu dans lequel ils sont stockés.

La maîtrise de ces perturbations passe par des dispositions de conception, puis des règles de costockage des colis déchets MA-VL pendant l'exploitation (par exemple pour éviter qu'en après fermeture, des produits de dégradation chimique d'une famille de colis MA-VL ne perturbent le comportement des radionucléides d'une autre famille de colis de déchets MA-VL. C'est notamment le cas des familles de déchets contenant des composants organiques dont les produits de dégradation dans le temps peuvent complexer les radionucléides, et qui de ce fait ne sont pas stockés dans des alvéoles avec des familles de colis de déchets n'en contenant pas), et par l'éloignement physique des zones de stockage HA et MA-VL.

4.1.1.3 Perturbations mécaniques

Afin de limiter l'endommagement de la couche de Callovo-Oxfordien par le creusement en son sein d'ouvrages, les vides laissés après fermeture dans l'installation souterraine sont limités (les galeries, les puits et les descenderies sont remblayés, les alvéoles de stockage sont conçus et exploités pour minimiser également ces vides). Le stockage représente moins de 1 % du volume total de la couche du Callovo-Oxfordien environnante contribuant à limiter ses effets mécaniques sur le milieu géologique en général.

4.1.2 Panorama des risques d'origine externe

Les risques d'origine externe sont liés à des évènements d'origine naturelle (évènements climatiques et géodynamiques, séismes...) ou d'origine humaine (compte tenu de la nature même du stockage en particulier sa profondeur, les activités humaines dites d' « intrusion humaine involontaire » correspondent principalement à des forages en profondeur en considérant que le stockage a été oublié).

Les potentiels effets de ces risques sont eux aussi limités par des dispositions de conception :

- **évolution climatique et géodynamique**

  La localisation du stockage à 500 mètres de profondeur le protège sur le prochain million d'années des phénomènes d'évolution géodynamique lié à l'évolution du climat et d'érosion en surface ;

- **séismes**

  L'aléa sismique est examiné vis-à-vis de ses effets potentiels sur les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien et sur les ouvrages de fermeture, principalement les scellements.

  L'influence de la présence du stockage en cas de séisme sur la couche du Callovo-Oxfordien est considérée comme négligeable et ne conduit pas à remettre en cause ses propriétés favorables. Les éventuelles sollicitations sismiques des scellements et leurs effets sont négligeables quel que soit le niveau de l'aléa sismique ;

- **intrusion humaine involontaire**

  Au regard de l'échelle de temps considérée (le million d'années), et bien que des dispositions pour maintenir la mémoire de l'existence du stockage soient prises, l'oubli de l'existence du stockage est envisagé 500 ans après sa fermeture définitive.

  En cas d'oubli du stockage, la profondeur de la couche dans laquelle il est implanté permet d'isoler les déchets des activités humaines en surface ou faible profondeur. Par ailleurs, le site d'implantation du stockage et le stockage en lui-même ne présentent pas de ressources naturelles exceptionnelles qui favoriseraient une intrusion *via* un forage en profondeur.

4.1.3 Panorama des incertitudes résiduelles

Afin d'estimer si le fonctionnement du système de stockage est tel qu'attendu et que l'objectif fondamental de protection de l'homme et l'environnement est atteint, l'accent est porté en après fermeture sur l'intégration des connaissances scientifiques et technologiques et la maîtrise des incertitudes résiduelles identifiées.

La gestion des incertitudes résiduelles fait donc partie intégrante de la démonstration de sûreté. Pour cela, une analyse de l'état des connaissances scientifiques et technologiques disponibles est réalisée en regard des fonctions de sûreté que doivent assurer les composants (naturels et ouvragés) du système de stockage après-fermeture.

À l'issue de l'analyse du comportement du système de stockage tel qu'il peut être décrit au vu de l'état des connaissances scientifiques et technologiques et des incertitudes résiduelles associées, sont identifiés des scénarios de sûreté après fermeture. Ceux-ci sont ensuite évalués quantitativement en termes d'indicateurs appropriés (par exemple flux d'eau circulant dans les ouvrages souterrains, débits molaires de radionucléides au cours du temps à la sortie des colis, des alvéoles, de la couche de Callovo-oxfordien). Ceux-ci permettent de vérifier le fonctionnement du système de stockage dans son ensemble et de s'assurer de sa robustesse. Les évaluations de l'incidence sur la santé humaine exprimée en termes de dose permettent par ailleurs de vérifier les respects des objectifs de protection.

UN SOCLE DE CONNAISSANCES SOLIDE ET ROBUSTE ACQUIS SUR PLUS D'UNE VINGTAINE D'ANNEES

Plus de vingt ans de travaux de recherche et développement ont conduit à acquérir un solide et robuste socle de connaissances sur la couche du Callovo-Oxfordien et sur le site géologique en général, les déchets, les composants ouvragés, et les interactions entre le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, en termes de caractéristiques et de comportement dans le temps, notamment après fermeture.

Ce socle de connaissance a été enrichi au fur et à mesure des étapes clés du développement de Cigéo (dossier 2005, dossier 2009, Dossier d'options de sûreté en 2016...), en alimentant les travaux de conception et d'évaluation de sûreté suivant une démarche itérative pouvant conduire pour les objectifs d'une étape clé du développement de Cigéo à adopter des dispositions de conception qui réduisent des incertitudes de connaissances ou en minimisent les conséquences sur la sûreté, ou à accroître les connaissances pour en réduire les incertitudes.

4.1.3.1 Incertitudes résiduelles sur les données d'entrée

Incertitudes résiduelles sur les connaissances sur les colis HA et MA-VL

Le socle de connaissances des familles des colis de déchets détenu par l'Andra permet d'établir notamment l'inventaire radiologique stocké. L'Andra applique par prudence un facteur multiplicatif à l'ensemble des 144 radionucléides de l'inventaire radiologique ; ce facteur peut aller jusqu'à dix pour quelques familles de colis de déchets.

Incertitudes résiduelles sur les connaissances sur la couche du Callovo-Oxfordien

Compte tenu des nombreux travaux et études conduites depuis plus de 20 ans sur le site et la couche du Callovo-Oxfordien, le niveau d'incertitudes résiduelles sur les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien vis-à-vis de la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques est limité.

4.1.3.2 Incertitudes « technologiques » résiduelles

Conteneurs de stockage HA

La solution technique retenue pour le conteneur de stockage HA est étudiée depuis plus d'une vingtaine d'années. Étant donné les essais réalisés, les contrôles lors des opérations de manutention et leurs conditions de stockage, selon une approche prudente, il est postulé que des conteneurs perdent prématurément leur étanchéité dès la fermeture du stockage.

Scellements

Sur la base du bon retour d'expérience, notamment des expérimentations au Laboratoire souterrain de l'Andra, par ses homologues étrangers et des démonstrateurs en surface, un dysfonctionnement d'un scellement lié aux opérations de réalisation est jugé très peu vraisemblable.

Selon une approche prudente, il est postulé d'éventuels défauts d'interface entre des scellements et la couche de Callovo-Oxfordien ou des défauts de matériaux intrinsèques du scellement.

4.1.4 Panorama des perturbations éventuelles liées à la présence du stockage dans la couche du Callovo-oxfordien

Perturbations mécaniques

Les connaissances acquises permettent d'établir une bonne représentation de l'endommagement mécanique de la couche du Callovo-Oxfordien dans l'environnement direct des ouvrages souterrains. De manière prudente, des évolutions défavorables de cet endommagement sont envisagées (par exemple : au niveau des scellements pouvant conduire à une dégradation de leur performance hydraulique).

Perturbations thermiques

Les connaissances scientifiques acquises, et en particulier celles relatives aux alvéoles HA, permettent d'évaluer que l'intensité et l'extension spatio-temporelle des perturbations thermiques dues au stockage sur la couche du Callovo-Oxfordien sont limitées.

Perturbations liées à la production de gaz

Après sa fermeture, le stockage entre dans une phase dite « de transitoire hydraulique-gaz » due au retour progressif de l'eau de la couche du Callovo-Oxfordien dans les ouvrages de stockage (phénomène de resaturation), et à la production d'hydrogène provenant principalement de la corrosion des composants métalliques présents dans les ouvrages.

Les dispositions de conception visent à limiter autant que possible l'utilisation d'acier dans la constitution des composants laissés en place après-fermeture. Par ailleurs, la conception et la réalisation d'ouvrages de fermeture « passant au gaz »[7] permettent de limiter les pressions de gaz dans le stockage durant le transitoire hydraulique gaz et ainsi de préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien.

L'évaluation de cette phase a fait l'objet d'études expérimentales, notamment *in situ*, et de simulations numériques, qui montrent la robustesse des connaissances et des simulations réalisées, et permettent d'identifier les incertitudes résiduelles.

[7] Pour les scellements, la notion de « passant au gaz » doit s'entendre comme laissant passer suffisamment le gaz. L'atteinte des deux fonctions « passant au gaz » et « limitation du flux d'eau au sein du stockage) des scellements est obtenue par les caractéristiques remarquables des argiles gonflantes constituant de base des noyaux, le choix de mélange argile gonflante – autres composants (par exemple sable) et la densité du mélange.

Perturbations chimiques issues des déchets MA-VL

Après la fermeture du stockage, le retour progressif des eaux de la couche du Callovo-Oxfordien peut engendrer des perturbations chimiques en lien avec la présence des colis de déchets MA-VL (perturbations salines ou organiques), des composants en béton (perturbation alcaline) ou de corrosion des éléments métalliques. Si ces perturbations sont limitées, des dispositions techniques sont définies en matière de costockage physico-chimique des colis de déchets MA-VL, afin de limiter cette perturbation entre les colis de déchets dans les alvéoles, et in fine dans la couche du Callovo-Oxfordien.

DISPOSITIONS DE SURVEILLANCE PROPRES A LA PHASE APRES-FERMETURE

Des dispositions de surveillance sont mises en œuvre dès la phase de construction initiale, puis pendant la phase de fonctionnement et visent notamment à s'assurer du bon comportement des différents composants naturels et ouvragés.

La surveillance après fermeture, dont la durée minimale sera fixée par 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. Ces dispositifs seront choisis de manière à préserver la couche du Callovo-Oxfordien afin qu'elle puisse jouer pleinement son rôle et sans intervention vis-à-vis de la protection à long terme de l'homme et l'environnement.

Après publication du décret de démantèlement et de fermeture de l'INB et à l'issue des opérations préalables à la fermeture définitive de l'installation, il sera de la compétence de l'ASNR d'autoriser son passage en phase de surveillance. Cette autorisation sera délivrée au regard d'éléments complémentaires apportés par l'Andra et qui porteront notamment sur 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.

4.1.5 Évolution à long terme des formations encaissantes et de l'hydrogéologie

La couche du Callovo-Oxfordien est entourée de couches géologiques dites formations encaissantes. Ces formations encaissantes sont constituées de niveaux calcaires et de niveaux marneux. Elles n'ont pas de fonctions de sûreté, mais elles sont néanmoins une voie, dite de transfert, pour quelques radionucléides et substances toxiques chimiques sortant potentiellement du sommet et de la base de la couche du Callovo-Oxfordien. L'évolution des écoulements d'eau dans les niveaux ou zones aquifères des formations encaissantes au cours du prochain million d'années a été évaluée au moyen de simulations sur la base de scénarios d'évolutions climatiques potentielles marquées (évolution naturelle, évolution perturbée par les gaz à effet de serre), afin de couvrir le domaine d'évolution possible des écoulements d'eau (*i.e.* Évolution de l'hydrogéologie) sur le long terme. Ces simulations ont ainsi intégré les effets des évolutions climatiques sur l'érosion des formations géologiques affleurantes, et l'hydrographie.

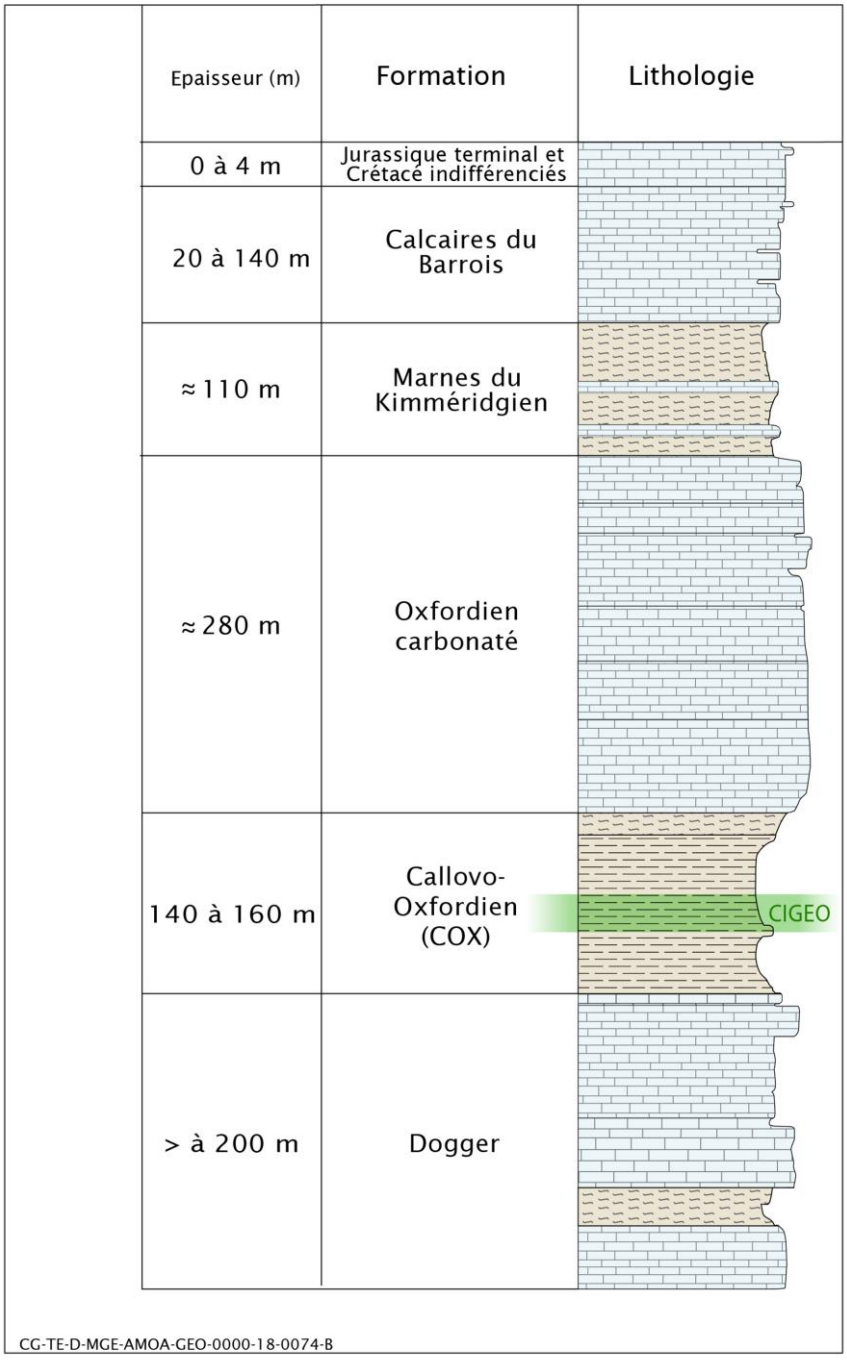


Figure 4-1 *Coupe géologique* simplifiée

4.2 Les scénarios d'évaluation de la sûreté après fermeture

L'évaluation quantitative de scénarios de sûreté après fermeture se fonde sur l'utilisation d'outils de simulation numérique capables de modéliser et de quantifier le relâchement et la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques, propres à chaque scénario.

L'évaluation de l'éventuelle incidence sur la santé humaine repose sur une démarche qui s'appuie sur le guide de sûreté n° 1 de l'ASN et sur les pratiques internationales.

Cette démarche mise en œuvre par l'Andra se décline en plusieurs étapes :

- choix des biosphères types à retenir pour l'évaluation ;
- choix de la localisation des points de prélèvements en eau (exutoires) pour l'alimentation des groupes de référence hypothétiques ;
- choix des groupes de référence hypothétiques à retenir pour les évaluations. Conformément à l'approche prudente usuelle pour ce type d'études sur de longues échelles de temps, il est fait l'hypothèse de plusieurs groupes hypothétiques potentiellement exposés avec des comportements représentatifs des habitudes et ressources de la biosphère dans son cadre régional ;
- définition des voies d'exposition à l'homme et des voies de transfert potentielles entre l'exutoire et l'homme.

⏩ **BIOSPHERE :** ensemble des écosystèmes comprenant tous les êtres vivants et le milieu où ils vivent.

Pour réaliser les évaluations quantitatives des scénarios d'évolution après fermeture, trois biosphères types sont retenues : une biosphère type tempérée, une biosphère chaude (type subtropicale humide) et une biosphère froide (type boréale). L'analyse repose sur des simulations qui considèrent deux évolutions climatiques et géomorphologiques sur le prochain million d'années : l'évolution naturelle (climat non altéré par l'activité humaine) et l'évolution considérant les effets anthropiques (climat altéré par les gaz à effet de serre).

4.2.1 Les « groupes de référence hypothétiques »

L'évaluation de l'incidence sanitaire est réalisée à partir de modélisations mathématiques : il est imaginé un groupe d'humains, dit de référence, groupe théorique qui vivrait à proximité des exutoires et pour lequel il est envisagé des comportements alimentaires variés. Cette diversité vise à s'assurer que le fait pour un individu de consommer par exemple beaucoup plus de viande ou de fruits que la moyenne, ou de pratiquer une activité de pêche en rivière, ne conduirait pas à un impact non acceptable sur sa santé. Pour chaque exutoire retenu, différentes activités possibles qui font un usage de l'eau sont également examinées : eau de boisson, abreuvement des animaux, irrigation.

Les différents groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations quantitatives sont :

- un groupe multi-activités ;
- un groupe (multi-activités) « éleveur bovins » ayant une consommation plus importante de bœuf et de produits laitiers ;
- un groupe (multi-activités) « jardinier » ayant une consommation plus importante des produits issus du verger et du jardin potager ;
- un groupe (multi-activités) « pêcheur-chasseur » ayant une consommation issue des activités de pêche en rivière et chasse de gibier.

⏩ **EXUTOIRE :** lieu (dans les couches de terrain situées en surface, en subsurface ou en profondeur) où l'eau, éventuellement chargée de substances radioactives, peut rejoindre la biosphère.

4.2.2 Les différents scénarios

Les scénarios après fermeture visent à couvrir l'ensemble des possibilités, même très peu vraisemblables, d'évolution sur le prochain million d'années du stockage et de son environnement géologique après fermeture. Ils sont classés en quatre grandes catégories :

- **un scénario d'évolution normale** qui vise à représenter le système de stockage tel que conçu dans lequel on considère que toutes les fonctions de sûreté après fermeture sont assurées. Il comprend deux situations :
  - ✓ une situation de référence, qui repose sur un ensemble d'hypothèses et de données qui s'appuient sur la meilleure connaissance scientifique et technique disponible et représente l'évolution attendue du stockage ;
  - ✓ une situation « enveloppe », qui constitue une estimation majorante des expositions individuelles afin de couvrir de façon enveloppe les incertitudes de connaissances résiduelles.
- **un ensemble de scénarios qui permet de couvrir différentes déviations de cette évolution normale**. Ces scénarios envisagent des dysfonctionnements de composants qui contribuent à la réalisation des fonctions de sûreté : scellement, colis HA, discontinuité non détectée dans la couche du Callovo-Oxfordien. Selon les situations, ces scénarios se déclinent en :
  - ✓ scénarios « d'évolution altérée » représentatifs d'événements ou processus jugés peu vraisemblables au regard de l'état de la connaissance scientifique et technologique ;
  - ✓ scénarios qualifiés de « *What-if* [8]» reposant sur le 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 afin de démontrer la robustesse du système de stockage dans sa globalité ;
  - ✓ scénarios d'intrusion humaine involontaire dans la zone d'implantation des ouvrages de stockage, par méconnaissance de son existence.

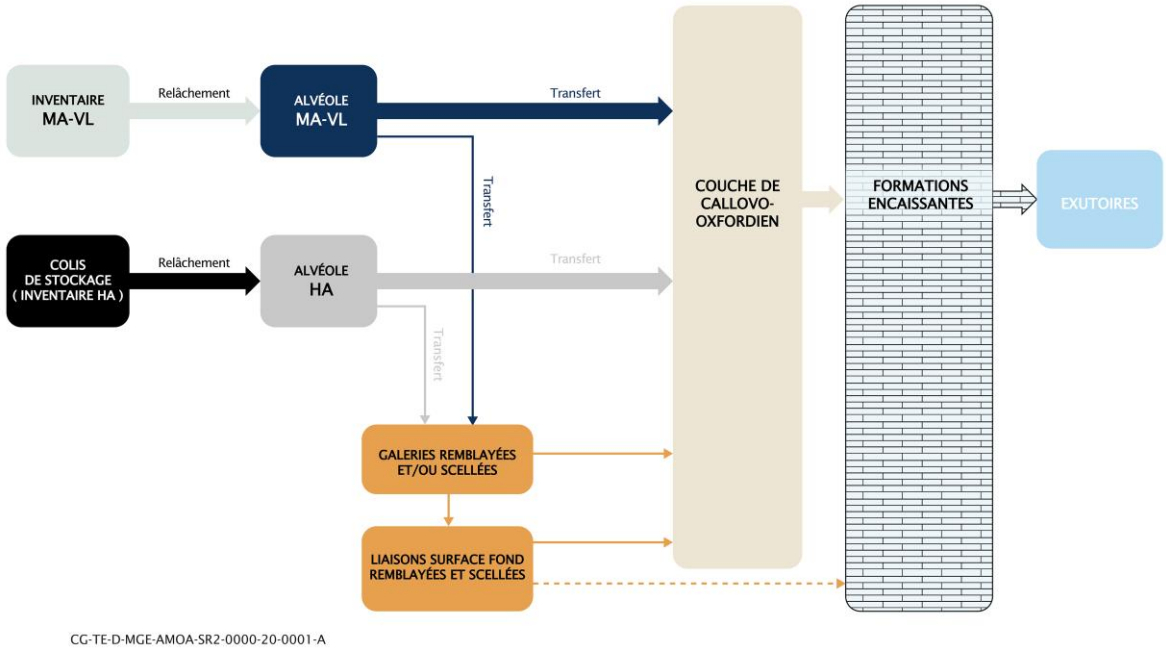


Figure 4-2 *Schéma illustratif des composants et des voies de transfert pour le scénario d'évolution normale*

[8] Terminologie anglaise signifiant « Et si » communément retenue au plan national et international

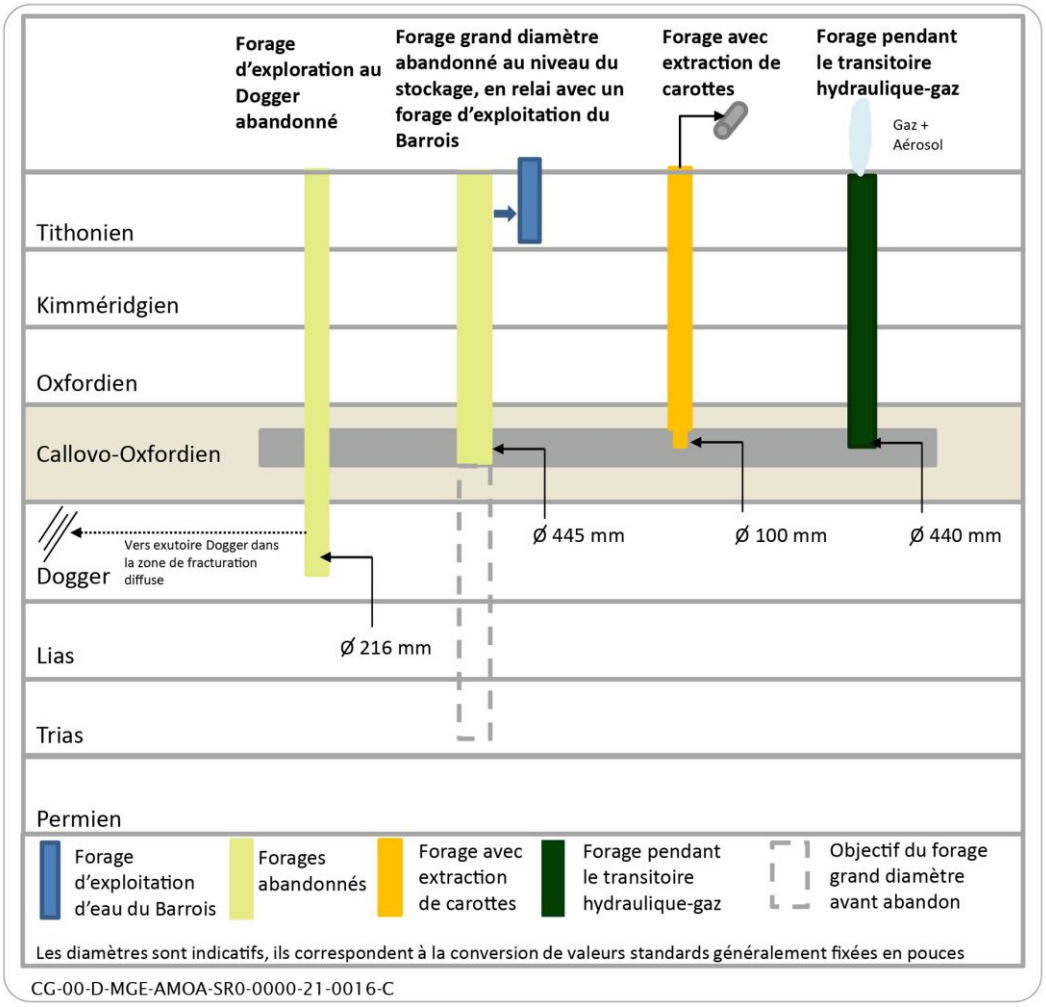


Figure 4-3 *Schéma illustrant les différents cas de forages postulés dans les scénarios d'intrusion humaine involontaire*

4.3 L'évaluation quantitative des scénarios de sûreté après fermeture

4.3.1 Évaluation de la situation de référence du scénario d'évolution normale

Les résultats des évaluations de la situation de référence de l'évolution normale de l'installation de stockage soulignent le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien et des incidences sanitaires sur l'homme très faibles. Ils montrent que :

- l'essentiel des 144 radionucléides contenus dans les colis de déchets reste dans les alvéoles de stockage ou dans la couche du Callovo-Oxfordien au pourtour proche du stockage. Seuls les quelques radionucléides mobiles à vie longue (sélénium 79, iode 129 et chlore 36) peuvent migrer sur un temps très long hors du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- le système de stockage dans son ensemble permet de répondre aux objectifs de protection en après-fermeture ;
- s'agissant des substances toxiques chimiques, seules les substances mobiles, principalement le sélénium et le bore parviennent aux exutoires, mais leurs concentrations maximales aux exutoires sont très inférieures aux normes réglementaires de qualité et les valeurs de QD et d'ERI restent inférieures aux valeurs de référence.

En termes d'indicateur de dose à l'homme, la dose maximale atteinte intervient après plus de 600 000 ans. Elle est faible, de l'ordre de 0,0015 mSv/an, donc très inférieure à la valeur de référence de 0,25 mSv/an citée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN.

4.3.2 Évaluation des autres situations et scénarios

La situation d'évolution normale « enveloppe », qui constitue une estimation conservative des impacts en situation d'évolution normale du stockage, confirme la robustesse du système de stockage face aux incertitudes résiduelles de connaissance.

Elle montre que la grande majorité des radionucléides reste toujours confinée dans les ouvrages de stockage ou dans la couche du Callovo-Oxfordien à proximité des ouvrages réalisés dans la couche. Les quelques radionucléides qui migrent depuis le stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien sont globalement identiques à ceux de la situation de référence (iode 129, chlore 36 et sélénium 79). Les temps de transfert jusqu'aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien sont néanmoins plus courts que pour la situation de référence (de l'ordre de 100 000 ans à 200 000 ans).

S'agissant des substances toxiques chimiques, seules les substances mobiles, principalement le sélénium et le bore parviennent aux exutoires, mais leurs concentrations maximales aux exutoires sont très inférieures aux normes réglementaires de qualité et les valeurs de QD et d'ERI restent inférieures aux valeurs de référence.

La démonstration de la robustesse du système de stockage est renforcée par les résultats des scénarios de déviation de l'évolution normale. À titre d'exemple illustratif, ces déviations pourraient être dues à :

- une perte d'étanchéité prématurée de conteneurs de stockage HA ;
- un dysfonctionnement de scellements ;
- une éventuelle discontinuité qui n'aurait pas été détectée dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- une intrusion humaine involontaire (forage en grande profondeur).

Les résultats des évaluations de ces scénarios soulignent encore le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien, même avec des caractéristiques enveloppes, renforcé par la conception du stockage précitée (en particulier la modularité du stockage ou les longueurs de galeries depuis les alvéoles

jusqu'aux ouvrages de liaison surface-fond). Ces résultats sont pour l'essentiel similaires à ceux du scénario d'évolution normale, en termes de performances de confinement. L'impact de la santé humaine maximale en termes de dose annuelle reste dans la plupart des cas du même ordre de grandeur que celle du scénario d'évolution normale.

Dans tous les cas pour les scénarios d'évolution altérée, *What-if* et d'intrusion humaine involontaire, les niveaux de dose maximale restent inférieurs aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes et dans la plupart des cas inférieurs à la valeur de référence retenue pour le scénario d'évolution normale (0,25 mSv/an).

4.4 Les enseignements de l'évaluation des scénarios

L'évaluation des différents scénarios, et même en prenant en compte des valeurs pénalisantes, souligne le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien dans la sûreté à long terme grâce à ses caractéristiques : épaisseur importante, faible perméabilité, faible gradient hydraulique, forte rétention, faible diffusion des solutés sur des échelles de temps très grandes (plusieurs centaines de milliers à millions d'années).

La robustesse du système de stockage repose fortement sur les faibles circulations d'eau liées à la couche du Callovo-Oxfordien. Ainsi à titre d'exemple, même en postulant l'existence d'une fracture de la couche du Callovo-Oxfordien qui n'aurait pas été détectée, cette fracture ne constitue pas une voie de transfert privilégiée des radionucléides : seule une très faible fraction de l'inventaire total en radionucléides est mobilisée par la fracture. Ce comportement est lié au fait que la fracture ne peut pas faire circuler plus d'eau que ce que la couche du Callovo-Oxfordien est capable de donner, donc une quantité d'eau faible, même lorsque la fracture met en relation les deux formations sus et sous-jacente de la couche du Callovo-Oxfordien, le Dogger et l'Oxfordien Carbonaté.

L'ensemble des résultats de l'évaluation obtenus sont cohérents avec des observations faites sur la couche du Callovo-Oxfordien, mais aussi des formations argileuses profondes, quant à leur capacité sur des échelles de temps très grandes (plusieurs centaines de millions à millions d'années) à limiter les flux d'eau et les flux de solutés (cf. Les mesures des traceurs naturels ou l'observation de fractures montrant en particulier une très faible circulation d'eau ou un comportement hydraulique transparent, sauf dans des cas extrêmes de contexte tectonique qui n'est pas celui ayant prévalu dans le Bassin parisien depuis plusieurs millions d'années et dans les prochains milliers d'années), mais aussi leur pouvoir tampon physico-chimique face à des sollicitations physico-chimiques, comme celles, mêmes limitées et maîtrisées, du stockage sur la couche du Callovo-Oxfordien.

La conception de l'architecture souterraine tire parti de ces caractéristiques pour limiter les écoulements d'eau dans le stockage et contraindre la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques au sein de la couche du Callovo-Oxfordien, rendant ainsi cette migration très faible et lente.

À cela s'ajoutent des choix de conception prudents, comme la limitation de la température maximale dans la couche du Callovo-Oxfordien, la séparation des quartiers de stockage HA et MA-VL ou encore la présence d'un conteneur de stockage pour les colis primaires HA, qui visent à simplifier le comportement du stockage et de la couche du Callovo-Oxfordien dans le temps, donc à garantir sa maîtrise et limiter les incertitudes résiduelles.

Cet ensemble confère au stockage une grande robustesse face aux incertitudes résiduelles et aux défaillances possibles ou postulées de composants du système de stockage, comme par exemple une défaillance de tous les conteneurs de stockage HA ou de tous les scellements. Il n'en demeure pas moins que ces composants ouvragés jouent un rôle complémentaire à la couche du Callovo-Oxfordien en contribuant à garantir un confinement des radionucléides ou des substances chimiques toxiques dans le stockage et dans la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage, ou à limiter leur migration dans la couche du Callovo-Oxfordien.

5

La maîtrise des risques en exploitation

5.1 Les principes et méthodologie 46
5.2 La prise en compte des retours d'expérience 47
5.3 L'inventaire des risques en exploitation et dispositions envisagées pour leur maîtrise 48
5.4 L'analyse des conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement 60
5.5 Les systèmes de surveillance, moyens de secours et de gestion accidentelle 64

5.1 Les principes et méthodologie

La démarche relative à la démonstration de sûreté s'applique à toute installation nucléaire de base. Elle vise à démontrer que les dispositions techniques et les mesures organisationnelles mises en œuvre dans les 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 visent à prévenir les accidents et à en limiter les conséquences pour toutes les situations rencontrées (normale et dégradée, incidentelles et accidentelles, accidentelles aggravées). La démarche s'appuie sur :

- **le principe de « défense en profondeur »,** c'est-à-dire la mise en œuvre de plusieurs barrières de protection afin de prévenir et de limiter les risques ;
- **le principe ALARA** (*As Low As Reasonably Achievable* : aussi faible que raisonnablement possible) : cette démarche consiste à maintenir la dose reçue par les personnels d'exploitation et le public au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des techniques disponibles et des facteurs économiques et sociaux. Dans tous les cas, cette dose doit être inférieure aux limites réglementaires définies dans le code de la santé publique ;
- **des objectifs de radioprotection**, qui regroupent l'ensemble des dispositions visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes ou sur l'environnement. Ces objectifs sont définis par le Code de la santé publique et l'Andra s'appuie également sur les recommandations édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

La démonstration de sûreté en exploitation réalisée par l'Andra repose sur différentes étapes :

- l'analyse de risques, c'est-à-dire l'étude méthodique de l'ensemble des phénomènes physiques d'origines interne et externe susceptibles d'affecter l'installation ;
- l'analyse par situations de fonctionnement, c'est-à-dire l'étude méthodique des évènements susceptibles d'affecter l'installation ;
- l'évaluation des impacts radiologiques et non radiologiques des différentes situations de fonctionnement, afin de vérifier le respect des objectifs de protection et la capacité à gérer les situations accidentelles et post-accidentelles, le tout dans l'objectif de juger de l'acceptabilité de ces situations.

La démonstration de sûreté en exploitation porte sur l'ensemble de l'installation et en lien avec les opérations de construction et d'exploitation.

5.2 La prise en compte des retours d'expérience

La démonstration de sûreté en exploitation se base également sur une analyse et d'une prise en compte du retour d'expérience en construction et en exploitation d'autres installations. À titre d'exemple, pour les installations souterraines ont été regardés :

- **le WIIP (Etats-Unis)**

  Le WIPP est un centre de stockage profond exploité aux États-Unis pour des déchets radioactifs à vie longue d'origine militaire. Il est situé dans une formation salifère à environ 700 mètres de profondeur et a été mis en exploitation en 1999.

  En 2014, deux évènements, un incendie et une réaction exothermique à l'intérieur d'un colis de déchets ont successivement et à un intervalle de temps court, affecté les installations et entraîné un arrêt de l'exploitation jusqu'en janvier 2017, après la mise en œuvre de mesures correctives et leur approbation des autorités.

  Le retour d'expérience du WIPP met en avant plusieurs points repris pour Cigéo :

  - ✓ l'importance de la maîtrise du contenu des colis de déchets ;
  - ✓ la nécessité de disposer d'un dispositif de surveillance et de détection rapide ;
  - ✓ la séparation physique dans l'installation souterraine de Cigéo entre la zone travaux de la zone nucléaire ;
  - ✓ l'organisation de Cigéo favorisant une gestion rapide et efficace des situations accidentelles.

- **la mine d'Asse (Allemagne)**

  Asse est une ancienne mine de sel allemande reconvertie en stockage de déchets radioactifs en utilisant en l'état différentes cavités d'exploitation du sel. De la saumure contaminée provenant de la dissolution du sel par l'eau a été détectée dès 1994, soulignant un risque d'arrivée d'eau et un éventuel un risque d'effondrement des cavités par dissolution du sel. Cela a entraîné l'arrêt définitif du stockage de déchets radioactifs dans la mine d'Asse. L'Allemagne a depuis étudié plusieurs options pour la gestion du site d'Asse suite à l'accident et a relancé la recherche d'un site en vue de l'enfouissement de ses déchets.

  Le retour d'expérience de la mine d'Asse met en avant plusieurs points repris pour Cigéo :

  - ✓ une installation conçue et dédiée dès le départ uniquement pour le stockage de déchets radioactifs ;
  - ✓ prévoir les dispositions en amont pour permettre la récupérabilité des colis de déchets ;
  - ✓ une conception qui limite le risque d'infiltration d'eau dans l'installation souterraine ;
  - ✓ prévoir un dimensionnement prudent des revêtements/soutènements des installations souterraines ;
  - ✓ mettre en place une séparation totale de la zone d'exploitation nucléaire et de la zone où sont effectués les travaux de creusement afin d'éviter les risques liés à une coactivité.

- **Stocamine (France)**

  Stocamine est une ancienne mine d'exploitation de sel reconvertie en stockage de déchets industriels chimiques reçus dans des sacs (« *big-bag*s ») ou dans des fûts métalliques, parfois stockés sur des palettes en bois. Stocamine a connu un incendie en septembre 2002, provoqué par des échauffements internes au sein de déchets chimiques.

  Le retour d'expérience de Stocamine met en avant plusieurs points repris pour Cigéo :

  - ✓ l'importance du processus d'acceptation des colis en stockage ;
  - ✓ la mise en œuvre de dispositions de surveillance, de prévention et de lutte contre l'incendie, ainsi que la séparation entre la zone travaux et la zone nucléaire dans l'installation souterraine ;
  - ✓ la prise en compte des facteurs humains dans les analyses de risques et la gestion des situations accidentelles.

- **le Laboratoire de recherche souterrain de l'Andra**

  Le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne a connu deux accidents graves ayant entraîné chacun le décès d'un opérateur : l'un en 2002 lors du creusement du puits principal du Laboratoire (chute d'une plaque en acier) et l'autre en 2016 lors d'une opération de conformation d'un parement de galerie, opération réalisée sans problème particulier plusieurs dizaines de fois auparavant (chute d'un bloc de roche).

  Le retour d'expérience du Laboratoire souterrain de l'Andra met en avant plusieurs points repris pour Cigéo :

  - ✓ l'utilisation privilégiée du tunnelier pleine face pour le creusement des descenderies et des galeries d'accès, donc sans présence humaine en front de taille ;
  - ✓ les réalisations distinctes des activités de creusement de celles d'exploitation (mise en stockage des colis) ;
  - ✓ la mise en œuvre de dispositifs de surveillance des opérations de réalisation des ouvrages souterrains, et de tenue de ces derniers ;
  - ✓ la prise en compte des facteurs humains dans les analyses de risques relatifs aux travaux souterrains et la gestion des situations accidentelles afférentes.

5.3 L'inventaire des risques en exploitation et dispositions envisagées pour leur maîtrise

5.3.1 Risques internes nucléaires (liés à la présence des colis de déchets radioactifs)

Les risques dits « internes nucléaires » sont les risques liés à la présence d'éléments radioactifs au sein des colis de déchets.

5.3.1.1 Risque de dissémination de substances radioactives

Le risque de dissémination est lié à la présence de substances radioactives au sein ou à la surface des colis de déchets. Il concerne toutes les zones dans lesquelles cheminent les colis de déchets. Les dispositions prises vis-à-vis des risques de dissémination des substances radioactives en fonction des situations de fonctionnement sont les suivants :

- présence de deux barrières de confinement indépendantes en fonctionnement normal et en mode dégradé ;
- maintien en permanence d'au moins une barrière de confinement pour les situations incidentelles et accidentelles.



Figure 5-1 *Illustration du premier système de confinement associé aux déchets HA en colis de stockage constitué de deux barrières*

La ventilation peut intervenir pour compléter une barrière de confinement autant que de besoin. Les systèmes de confinement sont surveillés *via* des contrôles sur les colis et une surveillance radiologique des locaux, des contrôles des barrières de confinement statiques.

5.3.1.2 Risques d'exposition aux rayonnements ionisants

Le risque d'exposition aux rayonnements ionisants concerne principalement les travailleurs qui peuvent se trouver à proximité de colis HA et MA-VL. Il peut être d'origine :

- interne : mise en suspension et transferts par contact de la contamination présente à la surface des colis de déchets ou par rupture du confinement des colis de déchets ;
- ou externe : proximité des sources radiologiques.

En prévention, la maîtrise du risque d'exposition aux rayonnements ionisants est d'abord de privilégier les opérations téléopérées, en organisant le zonage radiologique de l'installation, dans le respect de la réglementation relative à la radioprotection des travailleurs.

La surveillance porte sur les locaux et sur les personnels concernés. Des balises de surveillance de la contamination ou de l'exposition externe sont couplées avec des alarmes permettant de prévenir le personnel de toute situation anormale.

Les principales dispositions pour limiter les conséquences en termes d'exposition externe et interne reposent sur un dimensionnement suffisant des locaux et équipements ayant une fonction liée à la radioprotection et des modalités d'intervention adaptées.

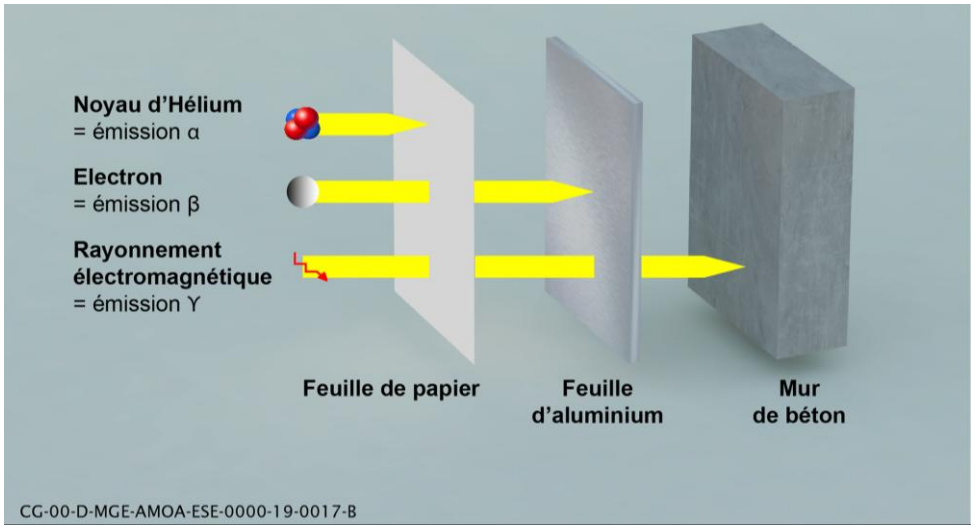


Figure 5-2 *Illustration du pouvoir de pénétration des différents rayonnements ionisants*

5.3.1.3 Risques liés à la criticité

Le risque de criticité est le risque de déclenchement intempestif et incontrôlé d'une réaction nucléaire en chaîne, contrairement à ce qui arrive dans un réacteur nucléaire où la réaction est initiée et contrôlée. Ce risque est lié à la présence de matières fissiles dans certains déchets et s'accompagne d'un dégagement considérable de rayonnements, de chaleur et d'un relâchement de produits de fission gazeux et d'aérosols.

La prévention du risque de criticité passe par une limite imposée à la masse de matières fissiles contenue dans les colis et par un mode de contrôle dans chaque partie de l'installation (entreposage et stockage).

5.3.1.4 Risques liés à la thermique des colis

Le dégagement thermique des colis de déchets HA et, dans une moindre mesure, de certains colis de déchets MA-VL est lié à la présence des radionucléides. Il est susceptible de dégrader les propriétés des matériaux, d'entraîner le dysfonctionnement d'équipements thermosensibles et/ou de créer des conditions de travail dangereuses pour le personnel.

Les risques liés à la thermique des colis concernent essentiellement les zones dans lesquelles les colis se trouvent en nombre important (zones tampons du bâtiment nucléaire de surface et alvéoles de stockage) ainsi que dans les espaces non ventilés et/ou de faible volume (cas des hottes de transfert par exemple).

Les dispositions de prévention pour la maîtrise du risque lié à la thermique des colis reposent sur la connaissance et la limitation de la puissance thermique des colis reçus (raison pour laquelle ils doivent d'abord être longuement entreposés avant prise en charge dans Cigéo), et le respect de la conception des colis de stockage ainsi que des locaux contenant les colis de déchets et leurs équipements. Un dispositif de surveillance est prévu afin de détecter toute élévation de température.

5.3.1.5 Risques liés aux gaz produits par radiolyse et par corrosion (susceptibles de conduire à un risque d'explosion)

Les risques liés aux gaz produits par radiolyse et de corrosion, principalement de l'hydrogène, sont analysés au regard de la prévention des explosions dans l'INB.

Pour qu'une explosion se produise, les conditions suivantes doivent simultanément être réunies :

- la présence d'un gaz, dont la concentration est telle qu'il se trouve dans son domaine 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).

Le phénomène de radiolyse provient de la présence de matières contenant de l'hydrogène dans les colis de déchets, et en particulier de certains colis MA-VL. Dans le cas des colis de déchets HA, la production de gaz de radiolyse est négligeable par rapport aux quantités produites par corrosion des aciers. Par effet des rayonnements ionisants, des gaz de radiolyse (principalement de l'hydrogène) peuvent être produits.

Les zones associées aux risques liés aux gaz de radiolyse et de corrosion sont celles dans lesquelles il existe un regroupement de colis émetteurs de gaz de radiolyse. Pour les cas des gaz de corrosion, il s'agit des zones où il y a un dégagement d'hydrogène résultant de la corrosion de matériaux métalliques.

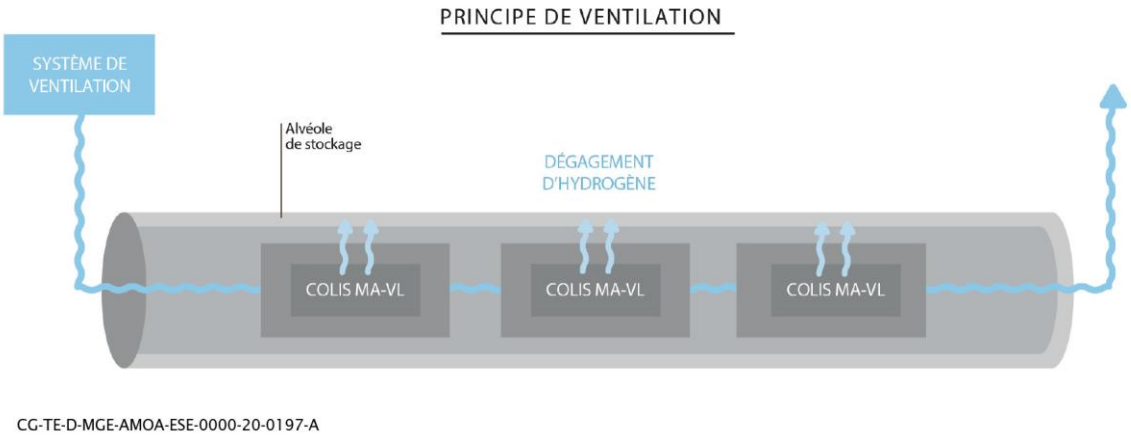


Figure 5-3 Illustration du principe de ventilation d'un alvéole de stockage MA-VL

En prévention, la maîtrise des risques liés aux gaz de radiolyse et de corrosion est assurée par deux principales dispositions :

- limitation à la source *via* les spécifications d'acceptation des colis, et donc un possible entreposage avant expédition et prise en charge dans Cigéo ;
- maintien, en fonctionnement normal, d'une concentration très inférieure à la limite d'explosivité, par des moyens de conception et/ou d'organisation selon la zone concernée.

La surveillance repose sur des capteurs de la concentration d'hydrogène et/ou d'oxygène dans l'air ambiant installés dans les zones exposées, avec différentes alarmes associées à l'atteinte des seuils.

Selon les zones, différents moyens sont mis en œuvre pour limiter les conséquences. À titre d'exemple peuvent être cités : dispositif de dégazage, capacité à remettre en route la ventilation avant d'atteindre dans les délais nécessaires la limite d'explosivité (sous 90 jours).

5.3.2 Risques liés aux agressions internes

Les risques d'agressions dites « internes » sont les risques non nucléaires liés à la construction et au fonctionnement des équipements et installations.

5.3.2.1 Risques liés aux opérations de manutention

Les opérations de manutention sont réalisées au moyen de différents types d'équipements dont les principaux sont :

- les équipements de levage : ponts de manutention et les tables élévatrices ;
- les équipements de transfert guidé sur rails : chariots de transfert de surface et de fond, les transbordeurs, le système de transfert des colis primaires, les navettes de surface, le funiculaire, les tables d'accostage, les tables de chargement et de réception ;

- les équipements spécifiques de mise en stockage : pont stockeur/chariot stockeur, robot pousseur/de retrait.

Lors de ces opérations, la chute d'un colis est susceptible d'entraîner une dispersion de substances radioactives, une exposition du personnel ou la perte d'un équipement assurant une fonction de protection de l'installation.

La conception des équipements de manutention utilisés s'appuie sur des solutions technologiques conventionnelles et éprouvées (meilleures techniques disponibles). Les dispositions de prévention visent à contrôler et limiter les vitesses de transfert, et à sécuriser les mouvements et les chaînes de levage afin d'assurer un maintien sécurisé de la charge manutentionnée en cas de survenue d'une défaillance ou agression.

À titre d'exemple, une attention particulière a été apportée sur le transfert des colis de stockage depuis la surface vers les ouvrages de stockage au moyen d'un transfert incliné dans la descenderie colis de l'installation nucléaire par funiculaire puis de transfert à l'horizontal vers les zones de leur mise en stockage une fois le funiculaire arrivé au fond.

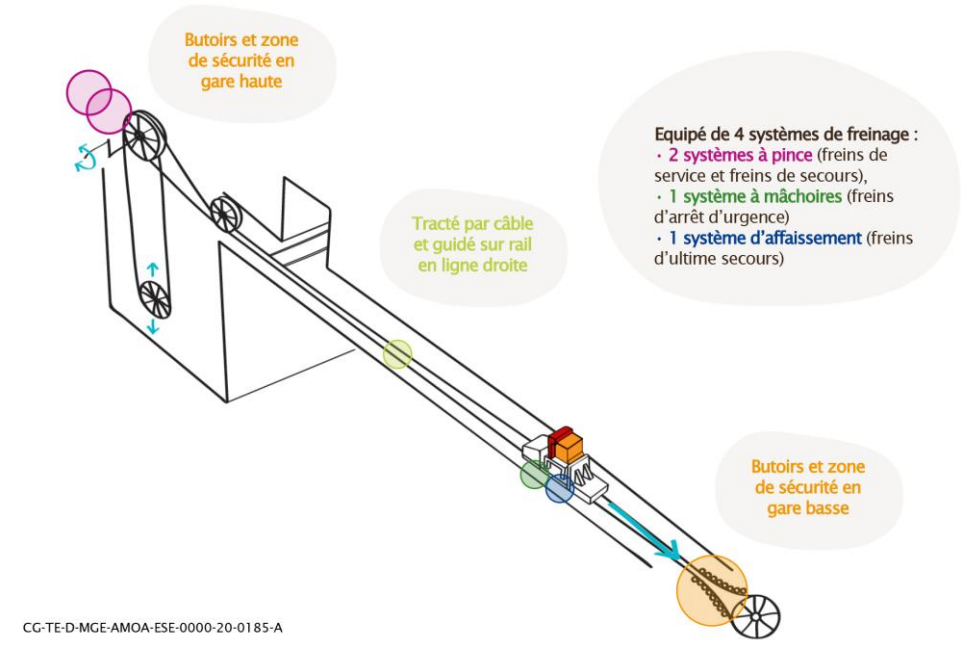


Figure 5-4 *Illustration des dispositifs de sécurité du transfert incliné par funiculaire en descenderie*

Les dispositions liées à la fiabilisation des opérations de manutention, à la limitation des hauteurs de levage mais aussi à la qualité intrinsèque des colis primaires et de stockage permettent de s'assurer du maintien de l'intégrité du confinement des colis même en cas accidentel de chute, renversement ou collision.

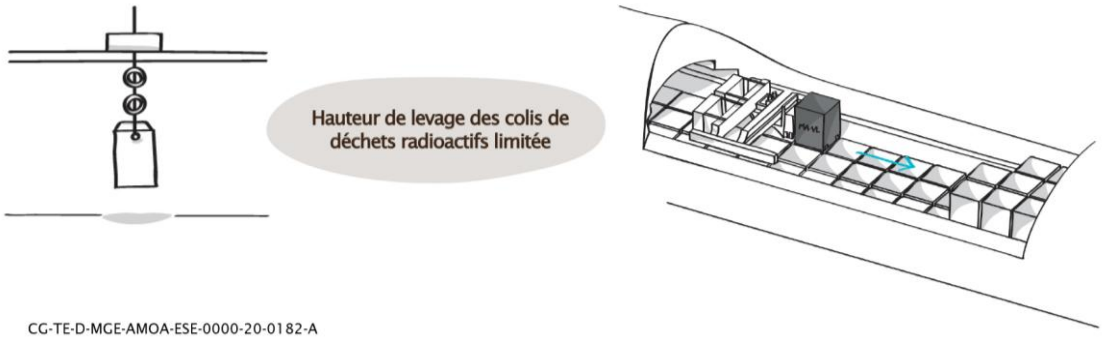


Figure 5-5 *Illustration de la manutention des colis de stockage MA-VL à faible hauteur*

Les opérations sont supervisées par les opérateurs proches et à distance grâce à l'instrumentation des équipements de manutention. En situation accidentelle, les mouvements des équipements sont arrêtés automatiquement.

5.3.2.2 Risques liés aux incendies

La maîtrise du risque incendie repose en premier lieu sur des dispositions de prévention des départs de feux *via* :

- la limitation des matières combustibles dans l'installation ;
- l'utilisation de matériaux, équipements et câbles difficilement combustibles voire incombustibles ;
- la limitation voire l'interdiction d'utiliser des produits s'enflammant rapidement (essence par exemple) ;
- la séparation physique des matériaux susceptibles d'alimenter un incendie ;
- la conception des moyens de manutention limitant les technologies présentant un risque de départ de feu.

La surveillance permet de détecter au plus tôt un début d'incendie, qui peut être maîtrisé :

- par la sectorisation des locaux : l'installation est conçue pour qu'en cas d'incendie, ce dernier reste circonscrit à un périmètre déterminé sans impacter les locaux adjacents ;
- par des moyens d'intervention et de lutte contre l'incendie, notamment la présence permanente sur site d'équipes d'intervention, combinée à l'installation de dispositifs de détection et d'extinction automatiques.

Le cas particulier des risques liés à l'incendie des colis de déchets bitumés

Les déchets conditionnés dans une matrice bitumée font l'objet d'une attention particulière vis-à-vis de leur sensibilité à une élévation de température.

Dans une démarche prudente, l'Andra ne prévoit pas le stockage des colis bitumés dans les premiers alvéoles mis en service. Les études de conception et de sûreté associées prévoient à ce stade deux modes de stockage quelle(s) que soi(en)t la ou les voies retenues à terme :

- un mode de stockage de colis de déchets bitumés en l'état mis dans des conteneurs en béton «renforcés » vis-à-vis de l'incendie, avant leur transfert et leur mise en stockage dans des alvéoles dédiés dont la conception est elle-même également renforcée vis-à-vis du risque incendie ;
- un mode de stockage de colis de déchets issus d'un traitement préalable visant la neutralisation des déchets bitumés.

5.3.2.3 Risques liés à l'explosion

Les risques d'explosion identifiés sont liés à la présence de batteries susceptibles de dégager de l'hydrogène en phase de charge, de produits chimiques susceptibles de générer des vapeurs inflammables et de bouteilles de gaz inflammables.

La maîtrise du risque d'explosion repose sur l'exclusion d'au moins une des trois conditions nécessaires à l'explosion : le combustible, le comburant, la source d'ignition (comme une étincelle). Les concentrations en hydrogène ou en ozone dans l'air font l'objet d'une surveillance en continu et la ventilation permet de dissiper ces gaz. Les systèmes de rétention des produits chimiques font l'objet d'une surveillance visuelle fréquente. La charge des batteries est réalisée dans des locaux situés à distance des secteurs à enjeu. Les équipements générateurs de gaz sont automatiquement arrêtés en cas de perte de la ventilation.

5.3.2.4 Risques liés à la perte de l'alimentation électrique

La perte d'alimentation électrique peut engendrer l'arrêt d'équipements nécessaires à la maîtrise d'autres risques, comme par exemple le confinement des substances radioactives, la ventilation qui permet d'éviter l'accumulation d'hydrogène, ou encore les dispositifs de surveillance de l'installation ou le conditionnement d'air des locaux techniques électriques.

La conception du système électrique repose sur une architecture électrique robuste, dotée de redondances ou encore de protections électriques, conforme aux normes en vigueur et permettant différents niveaux de fiabilité selon la fonction à assurer. Il est surveillé en continu afin d'identifier tout défaut et de procéder à une éventuelle reconfiguration du réseau.

En cas de défaillance sur les systèmes d'alimentation électrique, de nombreux équipements redondants permettent de prendre le relai des fonctions les plus importantes. De plus, une alimentation de secours permet d'alimenter les équipements les plus sensibles, comme le système de ventilation, le système de surveillance, le système de détection et d'extinction automatique incendie, l'éclairage de sécurité et les principaux systèmes de manutention. Si l'alimentation électrique, y compris alimentation de secours, est complètement coupée, les équipements se mettent automatiquement en sécurité.

5.3.2.5 Risques liés à la perte des fluides

Le risque de perte des fluides concerne les fluides de refroidissement, les fluides de chauffage, l'air comprimé, l'extinction incendie à eau, le réseau de production et de distribution d'azote.

Une surveillance continue est réalisée. Les équipements actifs des réseaux transportant ces fluides, voire certains réseaux eux-mêmes, sont redondants. Des réserves de secours sont prévues. En cas de défaillance, l'installation est mise en état sûr.

5.3.2.6 Risques liés à la perte de la ventilation

La ventilation assure notamment le confinement dynamique de certains locaux, le maintien de conditions atmosphériques adaptées, l'évacuation des gaz ou encore le désenfumage en cas d'incendie.

Le système de ventilation est conçu pour pallier de nombreux dysfonctionnements : redondance de certains équipements tels que les ventilateurs d'extraction et les filtres très haute efficacité, redondance de l'alimentation électrique ainsi que la protection au feu de certains équipements. Les équipements sont aussi conçus pour résister à des agressions externes comme les séismes ou des phénomènes climatiques extrêmes comme les tornades. Le système de ventilation fait l'objet d'une surveillance visuelle régulière des équipements, de maintenances préventives et d'une surveillance automatique des équipements par capteurs.

En cas de perte de la ventilation, les opérations en cours sont arrêtées le temps de corriger le problème. Un arrêt de la ventilation ne conduit pas à des conséquences immédiates sur la sûreté (la remise en service de la ventilation devant être effectuée dans un délai estimé à 90 jours).

5.3.2.7 Risques liés à la perte de la surveillance radiologique et des rejets gazeux

La surveillance radiologique participe à la maîtrise du risque d'exposition lié aux rayonnements ionisants. La prévention repose sur le respect des normes en vigueur pour les équipements de surveillance, la redondance de ces équipements et réseaux d'information, une alimentation électrique dédiée et une implantation hors de portée des incendies. Tout défaut est remonté à la salle de conduite automatisée.

Dès l'identification d'une perte de la surveillance radiologique, des actions d'évacuation du personnel et de consignation physique des locaux concernés sont mises en place par précaution le temps de procéder aux contrôles et correctifs nécessaires.

5.3.2.8 Risques liés à la perte du contrôle commande

Le contrôle commande désigne l'ensemble des systèmes qui effectuent automatiquement des mesures et assurent des fonctions de régulation ou de protection. Sa défaillance peut en entraîner d'autres comme un dysfonctionnement de la ventilation ou un défaut de la surveillance radiologique.

La conception du contrôle commande repose sur des systèmes éprouvés et est conforme aux normes en vigueur. Il fait l'objet d'une surveillance continue. En cas de dysfonctionnement, les équipements contrôles sont arrêtés de manière sûre par des automatismes complémentaires, ou ces équipements se mettent eux-mêmes en état sûr.

5.3.2.9 Risques liés à l'inondation interne

Le risque d'inondation interne émane de la présence de réseaux d'alimentation en eaux, de réseaux de collecte des effluents liquides et des fluides hydrauliques. L'inondation peut rester localisée ou être généralisée.

Les réseaux sont conçus selon les normes en vigueur et un programme de maintenance est mis en place. Les réseaux sont autant que possible éloignés des secteurs sensibles (locaux électriques par exemple) et certains équipements sont surélevés. Toute fuite est identifiée par des capteurs et des vannes peuvent fermer tout ou partie des réseaux.

5.3.2.10 Risques liés aux substances dangereuses non radioactives

Les opérations mettant en œuvre des substances dangereuses sont réalisées en l'absence de tout colis de déchets. Néanmoins, dans l'INB, des substances dangereuses comme l'acétone sont utilisées pour des opérations de maintenance et seraient susceptibles de dégrader des équipements comme les joints entre les hottes de transfert des colis et les façades d'accostage des alvéoles de stockage. Les opérateurs sont donc formés à l'utilisation de ce produit et à la surveillance des joints. Si l'acétone entre en contact avec les joints, des opérations de maintenance sont réalisées pour rétablir le confinement.

5.3.2.11 Risques liés à l'émission de projectiles

Les risques liés à l'émission de projectiles concernent des 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 principalement les pales des ventilateurs de soufflage et d'extraction d'air.

La prévention de ce risque repose sur la conception et la maintenance des ventilateurs. Toute défaillance est détectée au moyen de capteurs et, si nécessaire, le ventilateur défaillant est arrêté. La redondance des équipements, la séparation des réseaux de ventilation en fonction des bâtiments et des fonctions à assurer, et la mise en place de réseaux de ventilation spécifiques pour assurer des besoins ponctuels et locaux permettent de limiter les conséquences d'une émission de projectiles.

5.3.2.12 Risques liés au vieillissement des équipements et des ouvrages

Le vieillissement est la transformation ou la modification que subit un ouvrage ou un équipement par le simple effet du temps ou par l'effet des conditions d'ambiance auxquelles il est soumis. C'est un phénomène normal et inéluctable, qui peut se traduire notamment par des dysfonctionnements ou défaillances de plus en plus fréquentes d'un matériel voire une panne empêchant son fonctionnement.

La maîtrise de ce risque repose sur des dispositions de conception (notamment des matériaux et équipements résistants, ou encore une redondance des équipements), un programme de maintenance et de surveillances des matériaux et équipements, et le maintien de conditions d'ambiance stables pendant la phase de fonctionnement.

5.3.3 Risques liés aux agressions externes

Les risques d'agressions dites « externes ». Ce sont les risques non nucléaires, naturels ou anthropiques, survenant à l'extérieur des équipements et installations.

5.3.3.1 Risques liés à la chute d'aéronef (avion ou d'hélicoptère)

Les conséquences d'une chute d'aéronef (avion ou d'hélicoptère) sont essentiellement susceptibles d'affecter les installations de surface et les émergences de l'installation souterraine. Au-delà du choc sur les structures pouvant entraîner une destruction plus ou moins localisée du génie civil, le risque d'écoulement et d'inflammation de kérosène entraînant un incendie est également pris en compte. Compte tenu de son implantation à 500 mètres de profondeur, les ouvrages souterrains ne sont pas susceptibles d'être directement affectés par la chute d'aéronef.

Cigéo est positionnée à distance des aérodromes régionaux et des couloirs de survol aérien. La maîtrise des risques repose essentiellement sur le dimensionnement du génie civil des bâtiments afin qu'ils puissent résister à une telle chute. L'entreposage de colis dans les installations de surface est limité et interdit à l'extérieur du bâtiment nucléaire de surface. Les équipements sensibles comme les réservoirs d'eau incendie sont éloignés les uns et des autres afin d'éviter qu'ils ne deviennent tous inopérants en cas de chute d'un aéronef.

5.3.3.2 Risques liés à l'environnement industriel et aux voies de communication

Les installations situées dans l'environnement industriel de Cigéo et les voies de communication qui peuvent présenter des risques pour l'INB sont limitées. Il s'agit principalement de risques liés à la présence ou au transport d'hydrocarbures. Les conséquences sont limitées du fait d'un éloignement suffisant des sources de danger par rapport aux ouvrages et équipements situés dans l'INB et par un dimensionnement approprié des ouvrages et équipements susceptibles d'être impactés.

5.3.3.3 Risques liés au séisme

Le site d'implantation de Cigéo s'inscrit dans le Bassin parisien. La formation géologique d'accueil est très stable et l'activité sismique y est extrêmement faible.

Outre la détérioration des bâtiments et ouvrages, un 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.

La maîtrise des risques liés au séisme repose sur le dimensionnement des ouvrages et équipements, du point de vue de leur stabilité, de leur intégrité et de leur tenue fonctionnelle. Plus les conséquences potentielles d'une défaillance d'un composant sont importantes, plus la conception de ce composant est robuste.

5.3.3.4 Risques liés à l'inondation externe

Le risque d'inondation externe concerne les installations de surface (pluies, crues, tempêtes, rupture de tuyauteries extérieures...) et les ouvrages souterrains (infiltrations d'eau provenant des aquifères traversés par les liaisons surface-fond). L'inondation externe peut conduire à des risques de dispersion de substances radioactives, de perte d'alimentation électrique ou encore d'incendie par création de court-circuit.

Les dispositions de prévention sont les suivantes :

- des dispositifs de collecte et des bassins pour les eaux pluviales, conçus pour absorber des précipitations exceptionnelles ;
- le bâtiment nucléaire de surface dispose de parois et d'un radier étanche, avec un dispositif de collecte des eaux provenant des remontées de nappe ;
- les liaisons surface-fond sont dotées d'un revêtement étanche sur tout ou partie de leur hauteur. Dans le souterrain, les eaux sont collectées puis remontées en surface. Des dispositions additionnelles sont prévues pour les descenderies (parois étanches, systèmes de drainage).

Tous ces systèmes font l'objet d'une surveillance régulière, au moyen d'inspections et de capteurs, et cette surveillance est renforcée lors d'épisodes pluvieux intenses. Le retour d'expérience acquis dans l'exploitation du Laboratoire souterrain depuis plus de 20 ans donne un retour d'expérience conséquent à l'Andra.

5.3.3.5 Risques liés aux températures extrêmes

Les températures extrêmes, c'est-à-dire aux températures très chaudes ou très froides sont susceptibles d'entraîner des défaillances d'équipements, notamment de ventilation. Par exemple, les matériels sensibles aux hautes températures, comme les systèmes électriques, sont dans des locaux techniques ventilés. Si des températures très élevées en extérieur sont constatées, certaines opérations comme la manutention des colis peuvent être arrêtées pour éviter des défaillances liées à la surchauffe des matériels.

5.3.3.6 Risques liés aux vents extrêmes et aux tornades

Les installations sensibles sont conçues pour résister à des tornades ou à des rafales de vents violents allant jusqu'à plus de 230 km/h. Le principal risque est la mise en mouvement d'éléments devenant ainsi des projectiles. Ce risque concerne particulièrement les systèmes de ventilation, qui sont donc protégés.

5.3.3.7 Risques liés aux chutes de neige extrêmes

Les installations sensibles sont dimensionnées pour résister à une accumulation importante de neige sur les toitures. En complément, les prises d'air de la ventilation sont toutes situées en hauteur pour éviter les risques d'obstruction. Sur alerte vigilance de Météo-France, les installations peuvent être mises en sécurité et les accès sont déneigés.

5.3.3.8 Risques liés à la foudre et aux interférences électromagnétiques

La foudre peut conduire à des perturbations de l'alimentation électrique, des équipements électriques et électroniques, voire engendrer un départ de feu. Des dispositifs classiques (parafoudres, mise à la terre) protègent les équipements conducteurs et les installations électriques. Ils limitent le risque d'incendie généré par la circulation d'un courant fort.

5.3.3.9 Risques liés à l'incendie externe

Le risque d'incendie externe concerne les zones de surface de l'installation nucléaire du fait de leur environnement naturel composé de forêts et d'espaces de verdure ou de leur environnement industriel, lié notamment à la présence de station de carburant.

Les dispositions de prévention reposent principalement sur des mesures visant à maîtriser l'occurrence d'un feu à proximité des installations situées en surface dans la zone puits et la zone descenderie, en limitant les sources de dangers à proximité. Les matériaux utilisés pour les façades, les toitures ou encore les portes des bâtiments sont sélectionnés pour leurs propriétés de résistance au feu adaptées aux risques identifiés. Les équipements et l'organisation des secours mis en place au sein de l'INB pour la maîtrise des risques d'incendie, notamment internes, permettent d'intervenir efficacement contre ce risque.

5.3.4 Autres risques

5.3.4.1 Risques liés aux opérations de construction

Les opérations de construction génèrent des risques particuliers liés :

- à l'utilisation d'explosifs pour le creusement des puits (l'utilisation des explosifs disparaît dès la fin du creusement) : la prévention de ce risque repose sur des dispositions d'ordres technique et organisationnel habituellement mises en œuvre : réduction de la quantité d'explosifs sur site, séparation physique des détonateurs et des explosifs, éloignement des sources de chaleur et d'étincelles, recours exclusif à des personnels spécialisés. Tous les intervenants sont prévenus par des signaux sonores voire lumineux lors de l'utilisation d'explosifs. Les zones de tir sont signalées et leurs accès surveillés en cas d'utilisation. Des moyens de lutte contre l'incendie sont situés à proximité ;
- à la présence de carburant sur site : la réglementation relative aux transports de matières dangereuses sur voie publique est appliquée, notamment pour les opérations de déchargement (véhicules à l'arrêt). Les sites sont conçus (auvents, locaux fermés) pour protéger les opérations de déchargement ; les citernes, équipements et tuyauteries font l'objet d'une surveillance pour détecter d'éventuels dysfonctionnements. La limitation des conséquences repose sur la mise en place de moyens de lutte contre l'incendie et la réalisation d'une zone d'attente fermée.

5.3.4.2 Risques liés à la coactivité

Dans l'INB, la réalisation simultanée d'activités d'exploitation nucléaire et de construction d'ouvrages souterrains, notamment de creusement de nouveaux alvéoles de stockage, présente des risques dits de coactivité. Deux principes sont retenus pour éviter ces risques :

- 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 et étanches aux fumées ;
- une indépendance totale entre la zone en exploitation nucléaire et la zone en travaux. 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 de stockage sont par conséquent réalisés au sein d'un chantier dit « clos et indépendant » de l'installation nucléaire.

Les opérations de contrôles réglementaires, d'essais périodiques et de maintenance préventive sont planifiées à l'avance ce qui limite les risques de coactivité entre ces opérations et celles d'exploitation. Si nécessaire, ces dernières peuvent être interrompues.

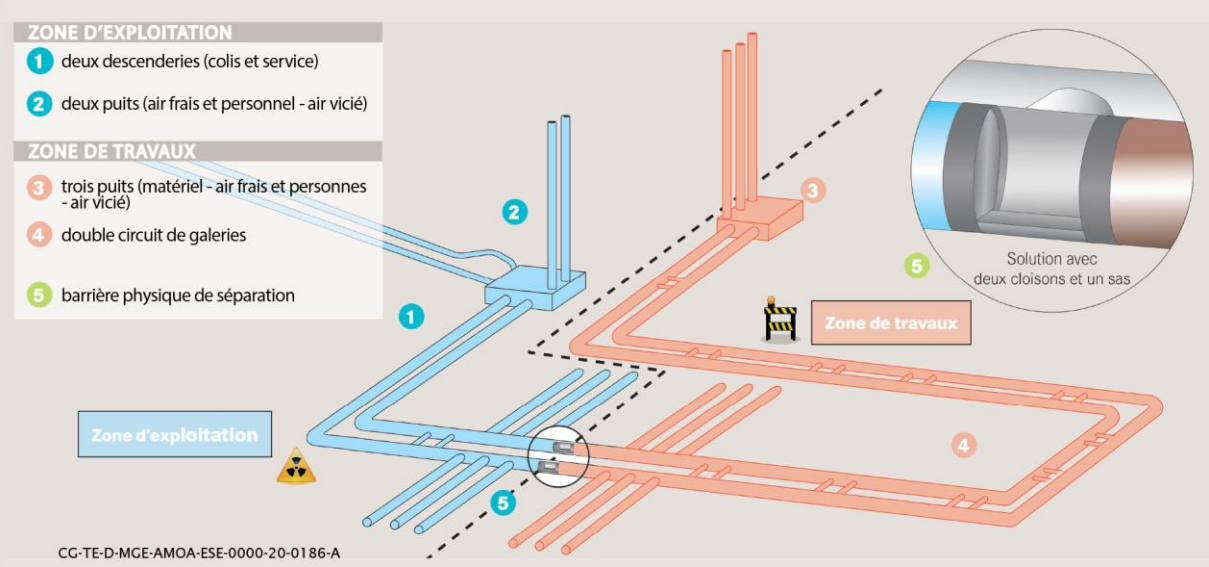


Figure 5-6 *Illustration des principes de gestion de la coactivité dans l'installation fond*

5.3.4.3 Risques liés aux facteurs organisationnels et humains

La maîtrise de ce risque se traduit par des exigences générales et non spécifiques à Cigéo pouvant être classées en quatre catégories suivantes :

- les dispositifs techniques : la documentation, le matériel, les outils utilisés, les interfaces homme/machine de pilotage, les moyens de suivi et de surveillance de l'installation ;
- l'environnement de travail : aménagement des locaux, des ambiances physiques en lien avec le travail ;
- l'organisation du travail : adéquation des objectifs et des tâches, compatibilité des rôles et répartition ;
- la gestion des équipes : gestion des effectifs, des compétences, de la formation, des qualifications et habilitations nécessaires, expérience des opérateurs, etc.

5.4 L'analyse des conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement

L'étude des situations accidentelles vise à analyser la robustesse de la démonstration de sûreté vis-à-vis de situations rendues peu probables compte tenu des dispositions de sûreté mises en place en termes de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences.

Les situations accidentelles identifiées dans la démonstration de sûreté sont principalement de type chute de colis ou incendie. Parmi toutes ces situations, sont développées :

- des situations accidentelles jugées plausibles, mais qui ne présentent pas d'impacts radiologiques significatifs sur l'homme et l'environnement ;
- des situations accidentelles dont la plausibilité est moindre mais qui seraient plus graves en termes de dose maximale sur l'homme et l'environnement.

Dans l'éventualité d'un accident sur Cigéo, l'analyse des scénarios accidentels, même les plus sévères, montre que les objectifs de protection ne sont pas dépassés et qu'ils ne conduisent pas à considérer le besoin de mesures de protection du public, ni dans le temps, ni dans l'espace (type mise à l'abri).

5.4.1 L'évaluation de l'impact sur l'homme des situations accidentelles

L'IMPACT RADIOLOGIQUE DE CIGÉO EN FONCTIONNEMENT NORMAL

L'impact radiologique de Cigéo en exploitation est évalué dans la « Pièce 6 - Étude d'impact du projet global Cigéo »(16), et plus précisément dans le volume 6 « incidence sur la santé humaine ».

Cette évaluation montre que l'impact radiologique de Cigéo en fonctionnement normal sur les populations riveraines est très faible : il est de l'ordre du microsievert, soit 1 000 fois inférieur à 1 millisievert (mSv), qui correspond à la contrainte fixée par la réglementation pour les usages artificiels de la radioactivité et des doses reçues en médecine. À titre de comparaison, cet impact est imperceptible au regard de l'exposition annuelle due à la radioactivité naturelle de la population française (2,9 mSv/an en moyenne).

Les conséquences des situations accidentelles sont analysées en imaginant des personnes localisées à différents endroits dans une logique pénalisante pour l'évaluation des impacts : personnes situées à l'extérieur et à proximité directe de la clôture du centre de stockage, personnes habitant les villages situés à proximité des zones puits et descenderie et qui seraient sous l'influence des rejets atmosphériques.

Trois durées d'exposition sont étudiées pour les évaluations de risque radiologique aux populations liées à un accident :

- pour le court terme, le délai d'exposition est de 24 heures ;
- pour le moyen terme, le délai d'exposition est d'un an ;
- pour le long terme, le délai d'exposition est de 50 ans d'exposition pour les adultes, porté à 70 ans pour les enfants les plus jeunes au moment de l'accident.

Afin d'évaluer les conséquences associées à des rejets de radionucléides, il est retenu différentes voies d'exposition pour l'homme :

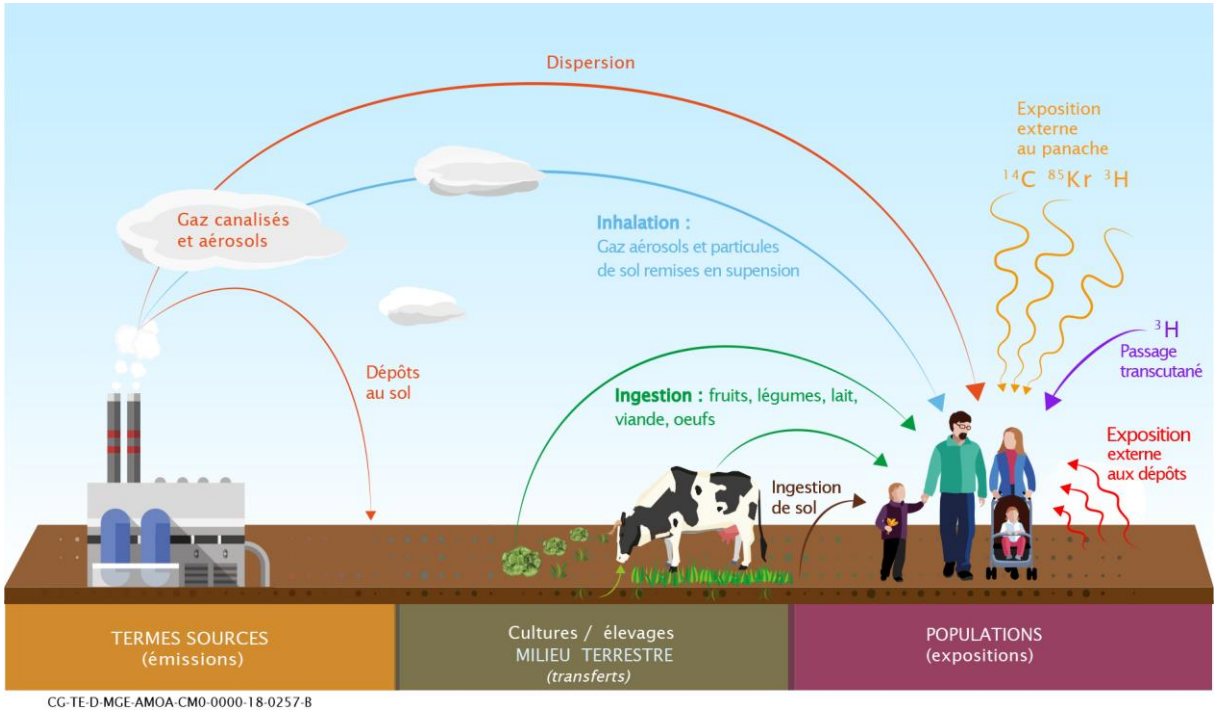


Figure 5-7 *Représentation schématique des voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques*

5.4.2 Illustrations de situations accidentelles pendant l'exploitation avec leurs impacts potentiels

Les exemples cités ci-après sont des situations jugées plausibles, mais qui ne présenteraient pas d'impacts radiologiques significatifs sur l'homme et l'environnement.

- **chute d'un colis primaire suite à la défaillance d'un pont,** auquel s'ajoute un dysfonctionnement du premier niveau de filtration.

  Les conséquences d'une telle situation sont une perte de confinement du colis de déchets manutentionné et, s'il y en a un, de celui situé à l'aplomb. Cet évènement engendrerait des rejets de substances radioactives à l'environnement. Il n'entraîne cependant pas de risque d'exposition interne du personnel car aucun travailleur n'est présent en cellule lors de l'exploitation de l'installation.

  Les principales dispositions de sûreté prises pour éviter cette situation sont : une conception robuste de la chaîne de levage des ponts nucléarisés, une limitation de la vitesse et de la hauteur de manutention au strict nécessaire, des balises de contamination atmosphérique en temps réel et la présence d'un second système de confinement avec maintien de son intégrité en cas de chute.

  Les impacts radiologiques maximaux du public vivant à proximité immédiate de Cigéo sont évalués sur une durée d'exposition d'au maximum 70 ans. Selon la nature des colis de déchets, ces impacts sont très faibles et s'échelonnent entre 0,001 mSv et 0,050 mSv. Les concentrations de substances toxiques chimiques maximales auxquelles serait exposé le public sont de l'ordre de 1 000 000 fois inférieures aux indicateurs de risque chimique.

- **incendie d'un chariot de transfert des colis dans le bâtiment nucléaire de surface**, auquel s'ajoute une défaillance du système d'extinction.

  Les conséquences de ce type d'accident proviendraient d'une remise en suspension de la contamination labile du colis présent sur la palette en cours de transfert ainsi que de colis potentiellement situés à proximité. Cet évènement engendrerait des rejets de substances radioactives à l'environnement ainsi qu'un risque d'exposition interne des travailleurs éventuellement présents à proximité.

  Les principales dispositions de sûreté prises pour éviter cette situation sont : limitation des charges calorifiques, choix des matériaux résistants au feu, présence d'un système de détection automatique d'incendie et d'extinction, zone tampon classée zone de feu et équipée d'un secteur de confinement, robustesse des colis primaires à l'échauffement.

  Les impacts radiologiques maximaux au public sont inférieurs à 0,001 mSv quel que soit le public considéré sur une durée d'exposition cumulée de 70 ans.

5.4.3 Illustration de situations accidentelles sévères et leurs impacts potentiels pendant l'exploitation

Les exemples cités ci-après sont des situations accidentelles très peu plausibles, mais qui seraient les plus sévères en termes de dose maximale sur l'homme et l'environnement.

Les impacts radiologiques sur le public sont estimés afin d'évaluer les besoins de mesures de protection à mettre en place à court terme. Dans ces conditions, les estimations sont effectuées en tenant compte d'une durée d'exposition de 24 heures. Les évaluations sont confrontées à l'objectif fixé par les autorités pour les situations accidentelles, cet objectif étant moins de 10 mSv pour le public.

- **chute d'un emballage ouvert de transport MA-VL lors de son déchargement dans le bâtiment nucléaire de surface**, auquel s'ajoute une défaillance du matelas amortisseur.

  Cette situation correspond à l'accident enveloppe conduisant aux doses absorbées les plus importantes autour de la zone descenderie. Elle engendrerait des rejets de substances radioactives et toxiques chimiques à l'environnement du fait de la perte de confinement de l'emballage de transport et les colis primaires MA-VL.

  Les principales dispositions de sûreté visant à empêcher cette situation accidentelle sévère sont : conception robuste de la chaîne de levage du pont sécurisé ; dimensionnement des matelas amortisseurs aux chutes de charges d'emballage de transport afin de maintenir leur confinement ; présence de travailleur apte à détecter l'évènement ; détection par remontée d'erreurs ou d'anomalie dans l'exécution des séquences du process et évacuation des travailleurs.

  Dès lors que la chute de l'emballage de transport conduisant au déconfinement des colis primaires qu'il contient est détectée, les dispositions de limitation des conséquences à disposition de l'exploitant afin de gérer la situation accidentelle reposent sur :

  - ✓ l'arrêt du process : l'emballage est immobilisé au sol ;
  - ✓ la reconstitution de l'intégrité du confinement de l'emballage (contrôles de non-contamination, vinylage des joints si nécessaire, etc.) ;
  - ✓ la mise en œuvre d'opérations de réparation du pont de manutention, si nécessaire, pour évacuer l'emballage vers une zone dédiée ;
  - ✓ la décontamination du hall de déchargement des emballages de transport.

  Les impacts radiologiques maximaux sont évalués en postulant des personnes qui resteraient localisées à 500 mètres du point de rejet et en continu pendant 24 heures. Les impacts s'échelonnent entre 1 mSv et 9 mSv selon la nature des colis de déchets. Les concentrations de toxiques chimiques maximales auxquelles serait exposé le public sont de l'ordre de 1 000 fois inférieures aux indicateurs de risque chimique.

  Selon les normes actuelles, la commercialisation des produits agro-alimentaires ne serait pas limitée et la mise en place de servitudes d'utilité publique n'est pas nécessaire.

- **inflammation d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage**

  Cette situation, dans l'hypothèse d'un stockage de colis de déchets bitumés en l'état (sans traitement), correspond à l'accident enveloppe conduisant aux doses absorbées les plus importantes autour de la zone puits. Elle entraînerait une perte de confinement et une dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques dans l'installation puis l'environnement *via* l'émissaire du puits air vicié exploitation.

  Sur détection de l'incendie, 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 radionucléides éventuellement remis en suspension. La ventilation d'extraction est toutefois stoppée lorsqu'il n'est plus possible de maintenir de bonnes conditions de filtration. Ensuite, malgré le confinement statique assuré par les parois de l'alvéole de stockage, il est postulé que des radionucléides 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.

  La dose maximale sur 24 heures reçue par le public reste inférieure à 0,75 mSv autour de la zone puits. Cet accident ne nécessite pas de mesures de protection (mise à l'abri) du public dans le temps et dans l'espace. Selon les normes actuelles, la commercialisation des produits agro-alimentaires ne serait pas limitée et la mise en place de servitudes d'utilité publique n'est pas nécessaire.

5.4.4 Situations accidentelles liées à la phase de construction initiale

En phase de construction, les substances radioactives ne sont pas présentes au sein de l'INB. Il est alors analysé des situations accidentelles pouvant avoir des incidences en termes d'effets chimiques, thermiques et/ou de surpression sur le public.

Par exemple, pendant la phase de construction de Cigéo, des explosifs sont utilisés pour le creusement des puits. L'évènement analysé correspond à une explosion dans le dépôt où sont stockés les explosifs. En cas d'explosion, seul le dépôt serait concerné. L'explosion n'engendre pas d'effets dominos sur les bâtiments ou équipements situés dans l'environnement proche. La définition de l'implantation des dépôts d'explosifs sera définie en phase ultérieure. Les distances d'effets évaluées avec des hypothèses très majorantes et dépendantes de la quantité d'explosifs mis en œuvre, seront prises en compte afin de définir l'implantation définitive des dépôts, de manière à ce qu'elles ne portent pas atteinte à la sûreté de l'INB, *via* la mise en œuvre de dispositions de limitation des conséquences d'une explosion d'explosifs pouvant reposer sur :

- le dimensionnement du dépôt aux effets de l'explosion ;
- la mise en place de périmètres de sécurité autour du dépôt.

5.5 Les systèmes de surveillance, moyens de secours et de gestion accidentelle

5.5.1 Systèmes de surveillance

Le dispositif de surveillance mis en place au sein de Cigéo contribue à protéger les personnes (travailleurs et public) et l'environnement des risques induits par la radioactivité des déchets.

5.5.1.1 Surveillance radiologique

La surveillance radiologique des locaux (mesure et contrôle de la contamination atmosphérique et des niveaux d'irradiation) est assurée par des équipements installés sur l'ensemble de l'installation. Ces équipements assurent une surveillance en temps réel de l'état radiologique. Cette surveillance est complétée par des appareils mobiles de prélèvements atmosphériques installés en fonction des besoins.

5.5.1.2 Surveillance de la contamination atmosphérique

Des dispositifs permettent une surveillance en temps réel ou différé du niveau de contamination atmosphérique. Ces dispositifs sont adaptés aux différents locaux, aux substances qu'ils contiennent et aux opérations réalisées (filtration sur filtre ou cartouche). Cette surveillance s'accompagne de vérifications du bon état physique des dispositifs avec des contrôles périodiques, de l'absence de contamination et de suivi du bon fonctionnement avec des capteurs permettant de signaler tout dysfonctionnement.

5.5.1.3 Surveillance radiologique des effluents gazeux

Les faibles émissions gazeuses et particulaires liées à la présence des colis de déchets radioactifs sont à l'origine de rejets dans l'atmosphère. Ces rejets atmosphériques sont effectués *via* deux émissaires, l'un au niveau de l'installation nucléaire de surface et l'autre au niveau du puits d'air vicié de la zone en exploitation de l'installation souterraine, permettant de les canaliser et de les filtrer pour partie. Leur surveillance est assurée au niveau de chaque émissaire par des mesures de débit et des mesures périodiques et/ou en continu des activités des rejets canalisés de la ventilation nucléaire.

5.5.1.4 Surveillance radiologique des effluents liquides

La surveillance radiologique des effluents liquides s'effectue selon les modalités suivantes :

- des contrôles périodiques analysés en temps réel pour les effluents liés aux opérations courantes d'exploitation tels que les eaux d'exhaures des descenderies et des puits d'exploitation ;
- des contrôles réguliers par prise d'échantillon et par analyse différée en laboratoire pour les effluents liés à des opérations ponctuelles tels que les eaux de condensats, les effluents éventuels liés à des opérations dans les bâtiments nucléaires de surface, les eaux d'exhaures des alvéoles de stockage HA et les eaux d'extinction incendie.

L'ensemble ces effluents, potentiellement radioactifs, sont collectés, puis contrôlés radiologiquement et transférés vers une filière externe pour leur traitement. Ils ne sont pas rejetés dans le milieu naturel local.

5.5.2 Moyens de secours et de gestion accidentelle

L'installation nucléaire dispose d'un système de secours dédié, doté de moyens en adéquation avec la nature des risques auxquels l'installation est exposée.

L'installation dispose également de forces d'intervention internes composées *a minima :*

- d'une équipe force de sécurité correspondant aux secours internes, présents 24 h/24 h ;
- d'une équipe de radioprotection ;
- d'une équipe environnement.

Ces équipes peuvent être renforcées d'équipes techniques, voire de secours externes.

Lorsque l'intervention humaine dans la zone accidentée reste possible, les équipes d'intervention disposent de matériels spécialisés adaptés à la situation, tels que, entre autres : véhicules et équipements de lutte contre l'incendie, matériel de mesure d'une contamination surfacique, matériel de décontamination.

En cas de survenue d'une situation accidentelle où l'ambiance radiologique ne permet pas l'intervention *in situ* de personnel, les opérations de reconnaissance et d'analyse de la situation, de reprise du ou des colis accidentés ainsi que l'évacuation de tout terme source de la zone accidentée doivent être réalisées par des moyens matériels déportés ou de robots téléopérés. Ces zones sont équipées de balises de surveillance de la contamination atmosphérique, qui permettent d'analyser avant intervention la situation au sein des cellules.

Des dispositions de gestion de crise sont définies dans le cadre du plan d'urgence interne (PUI) pour déployer, à temps, des moyens d'urgence adaptés (techniques, organisationnels et humains) afin de gérer la crise et d'en limiter les conséquences. Le déclenchement du PUI se traduit par la constitution de différents postes de commandement (poste de commandement central, poste de commandement avancé, poste central de sécurité, etc.) dont l'organisation est conçue dans le but de prévenir en temps réel un développement plus grave de l'accident et en limiter les conséquences. Des exercices de mise en œuvre du PUI sont réalisés avec la participation des acteurs concernés des pouvoirs publics et de l'ASNR.

Tableau 5-1 Objectifs d'un Plan d'urgence interne (PUI)

1	Maîtriser la situation d'urgence de façon à en prévenir et/ou limiter les conséquences
2	Alerter, informer et coopérer avec les autorités publiques et les services extérieurs compétents pour prévenir et/ou limiter les conséquences de la situation d'urgence
3	Alerter et protéger le personnel, porter secours aux victimes
4	Le cas échéant, caractériser l'état radiologique du site et caractériser l'état radiologique de l'environnement à l'extérieur du site
5	Informer les parties prenantes locales et les médias en liaison avec les pouvoirs publics

TABLEAU DE TRAÇABILITE DES PRINCIPALES EVOLUTIONS

Le tableau suivant précise les paragraphes qui présentent des évolutions ainsi que leur origine qui peut être de différente nature :

- évolution réglementaire : mise en cohérence avec les évolutions de réglementation post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- instruction technique avec l'ASNR : intégration de précisions apportées à l'ASNR en cours d'instruction technique en lien avec le contenu du dossier de DAC ;
- cohérence dossier : mise en cohérence entre pièces du dossier de DAC ;
- cohérence DR0 : mise en cohérence avec le dossier DR0 déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossier de chiffrage : mise en cohérence avec le dossier de chiffrage déposé post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence dossiers PNGMDR : mise en cohérence avec les dossiers en réponse au PNGMDR déposés post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence politique énergétique : mise à jour de l'inventaire de réserve et des études de sûreté associées pour tenir compte des évolutions de politique énergétique. Ces éléments ont été communiqués à l'ASNR dans le cadre de l'instruction technique ;
- cohérence planning : intégration de la mise à jour de la date de mise en service annoncée post-dépôt initial du dossier de DAC ;
- cohérence conditionnement : mise en cohérence avec les évolutions de conditionnement des colis primaires annoncées par les producteurs post-dépôt initial du dossier de DAC.

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
2.2	Les phases temporelles de Cigéo								X	
2.3	Les déchets destinés au stockage dans Cigéo			X						
3.1	Les fonctions de sûreté après fermeture			X						

Paragraphe actualisé		Actualisation liée à								
		Évolution réglementaire	Instruction technique avec l'ASNR	Cohérence dossier	Cohérence DR0	Cohérence dossier de chiffrage	Cohérence dossiers PNGMDR	Cohérence politique énergétique	Cohérence planning	Cohérence conditionnement
4.3	L'évaluation quantitative des scénarios de sûreté après fermeture		X							

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Illustration de la décroissance dans le temps de la radioactivité totale des déchets de l'inventaire de référence de Cigéo (courbe rouge) et de la radioactivité de l'inventaire total des colis de déchets HA0, HA1/HA2 et MA-VL (courbes pointillées)	9
Figure 1-2	Illustration de l'effet de la radioactivité, du becquerel (Bq) au sievert (Sv)	10
Figure 1-3	Illustration des types d'exposition à la radioactivité	10
Figure 2-1	Phases temporelles de Cigéo	15
Figure 2-2	Volumes des colis de déchets HA et MA-VL pris en compte dans les études de conception de Cigéo	16
Figure 2-3	Localisation dans l'est de la France de Cigéo	18
Figure 2-4	Localisation des installations de surface de Cigéo	19
Figure 2-5	Représentation schématique des ouvrages souterrains de Cigéo et de leur déploiement dans le temps	20
Figure 2-6	Représentation schématique du périmètre INB Cigéo	21
Figure 2-7	Cheminement des colis de déchets de leur arrivée à Cigéo jusqu'à leur emplacement de stockage	22
Figure 2-8	Illustration de l'installation souterraine de Cigéo après fermeture (c'est-à-dire une fois remblayée et scellée, sous réserve de l'autorisation de sa fermeture par une loi)	23
Figure 3-1	Schéma illustrant la démarche de sûreté générale appliquée à Cigéo	27
Figure 3-2	Schéma illustrant les processus de décroissance, d'atténuation et de retard d'un radionucléide mis en jeu lors de sa migration par diffusion dans le temps à une distance donnée d'une source (flux du radionucléide arrivant à une distance donnée d'une source du radionucléide représentée ici par une quantité relâchée de manière constante dans un intervalle de temps donné)	30
Figure 4-1	Coupe géologique simplifiée	39
Figure 4-2	Schéma illustratif des composants et des voies de transfert pour le scénario d'évolution normale	41
Figure 4-3	Schéma illustrant les différents cas de forages postulés dans les scénarios d'intrusion humaine involontaire	42
Figure 5-1	Illustration du premier système de confinement associé aux déchets HA en colis de stockage constitué de deux barrières	49
Figure 5-2	Illustration du pouvoir de pénétration des différents rayonnements ionisants	50
Figure 5-3	Illustration du principe de ventilation d'un alvéole de stockage MA-VL	51
Figure 5-4	Illustration des dispositifs de sécurité du transfert incliné par funiculaire en descenderie	52
Figure 5-5	Illustration de la manutention des colis de stockage MA-VL à faible hauteur	53
Figure 5-6	Illustration des principes de gestion de la coactivité dans l'installation fond	59
Figure 5-7	Représentation schématique des voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques	61

Tableaux

Tableau 5-1 Objectifs d'un Plan d'urgence interne (PUI) 65

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 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/content/download/50883/352509?version=2.

2 Dossier d'options de sûreté - Partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR20000150062. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.

3 Dossier d'options de sûreté - Partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOASR10000150060. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf.

4 Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Assemblée nationale; Sénat (1992). Journal officiel de la République française (JORF), N°INDX9100071L.

5 Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Assemblée nationale; Sénat (2006). Journal officiel de la République française (JORF), N°ECOX0600036L.

6 Programme français de R-D sur le stockage géologique de déchets radioactifs : revue internationale par des pairs du Dossier 2001 Argile. Nuclear Energy Agency (NEA); Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (2003). 80 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/nea4588-andrafr.pdf.

7 Sûreté du stockage géologique de déchets radioactifs HAVL en France : examen international par des pairs du "Dossier 2005 Argile" concernant le stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien. Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE); Nuclear Energy Agency (NEA) (2006). N°NEA 6179. 81 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2006/nea6179-havl.pdf.

8 An International Peer Review of the Safety Options Dossier of the Project for Disposal of Radioactive Waste in Deep Geological Formations (Cigéo): final report of the IAEA International Review team. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017). N°IAEA/CIG/FRA. 43 p. Disponible à l'adresse : https://www.iaea.org/publications/12223/an-international-peer-review-of-the-safety-options-dossier-of-the-project-for-disposal-of-radioactive-waste-in-deep-geological-formations-cigeo.

9 Résumé en français : Cigeo Peer Review. Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) (2016). 2 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Cigeo-Peer-Review-Report-Synthese-en-francais.

10 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). N°2018-AV-0300. 7 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/155337/1525188?version=3.

11 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. Assemblée nationale; Sénat (2016). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVX1614324L.

12 Définitions des concepts de base du risque accidentel. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (2022). Consulté le 14/12/2022. Disponible à l'adresse : https://www.ineris.fr/fr/risques/comment-evaluer-risque/composantes-risque/definitions-concepts-base-risque-accidentel.

13 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 19 - Version préliminaire des spécifications d'acceptation des colis. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-SPE-AMOA-SR0-0000-19-0040.

14 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 4 - Plans de situation au 1/10 000e indiquant le périmètre proposé. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-CM0-0000-21-0003.

15 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 13 - Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-PDG-AMOA-OBS-0000-19-0001.

16 Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Pièce 6 - Étude d'impact du projet global Cigéo. Andra (2026). Document N°CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-0000-22-0005.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
www.andra.fr

© Andra • 2026 • Conception-réalisation : www.kazoar.fr • Crédit illustration : Andra