RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA

2026

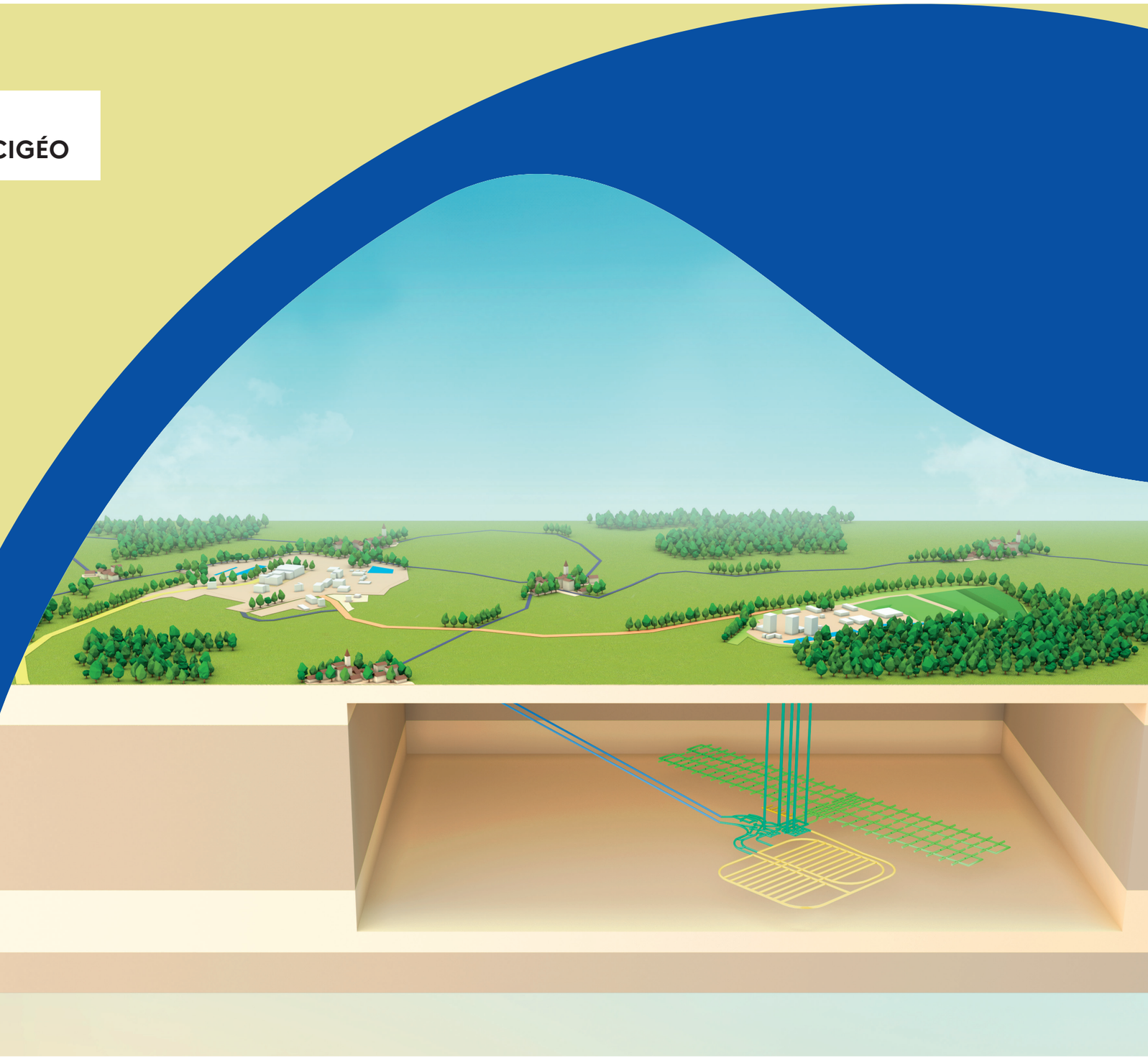
DOSSIER D'AUTORISATION DE CRÉATION DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE (INB) CIGÉO

PIÈCE 6

Étude d'impact du projet global Cigéo

Volume 6

Incidences sur la santé humaine



MISE À JOUR DE L'ÉTUDE D'IMPACT 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). La mise à jour de l'étude d'impact tient compte également des modifications apportées à l'analyse des incidences du projet global résultant des dossiers de la tranche de travaux DR0 concernant les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale et leur instruction.

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

- des barres vertes en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts apportés à l'étude d'impact du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo. Ces évolutions cumulent les modifications apportées à l'étude d'impact dans le cadre de l'EI-DAC (première actualisation déposée le 16 janvier 2023) et d'EI-DR0 portant sur les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale (dites DR0, deuxième actualisation déposée le 6 mars 2024) ;
- des barres bleues en marge du texte pour tracer les modifications ou ajouts apportés à l'étude d'impact depuis la version EI-DR0 ;
- un surlignage gris pour tracer les modifications ou ajouts depuis les consultations réglementaires ;
- des tableaux de traçabilité des principales évolutions de l'étude d'impact.

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

Sommaire

1. Populations les plus proches du projet global Cigéo 7

1.1 Au niveau du centre de stockage Cigéo 8

1.2 Au niveau des opérations des autres MOA 8

1.2.1 Sécurisation de la ligne 400 kV Houdreville – Méry 8
1.2.2 Adduction d'eau 10
1.2.3 Mise à niveau de la voie ferrée 027000 10
1.2.4 Déviation de la route départementale D60/960 12
1.2.5 Expédition et transport des colis de déchets radioactifs 12

2. Évaluation des incidences liées aux émissions physiques sur la santé humaine 13

2.1 Évaluation des incidences liées aux émissions sonores sur la santé humaine 14

2.1.1 Incidences potentielles 14
2.1.2 Mesures d'évitement et de réduction 15
2.1.3 Incidences résiduelles 16

2.2 Évaluation des incidences liées aux émissions vibratoires sur la santé humaine 22

2.2.1 Incidences potentielles 22
2.2.2 Mesures d'évitement et de réduction 22
2.2.3 Incidences résiduelles 22

2.3 Évaluation des incidences liées aux émissions lumineuses sur la santé humaine 23

2.3.1 Incidences potentielles 23
2.3.2 Mesures d'évitement et de réduction 23
2.3.3 Incidences résiduelles 23

2.4 Évaluation des incidences liées aux émissions olfactives sur la santé humaine 24

2.4.1 Incidences potentielles 24
2.4.2 Mesures d'évitement et de réduction 24
2.4.3 Incidences résiduelles 24

2.5 Évaluation des incidences liées aux champs électromagnétiques sur la santé humaine 25

2.5.1 Incidences potentielles 25
2.5.2 Mesures d'évitement et de réduction 27
2.5.3 Incidences résiduelles 27

3. Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine 29

3.1 Évaluation des incidences liées aux effluents chimiques liquides sur la santé humaine 30

3.1.1 Incidences potentielles 30
3.1.2 Mesures d'évitement et de réduction 33
3.1.3 Incidences résiduelles 34

3.2 Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques sur la santé humaine 39

3.2.1 Incidences potentielles 39
3.2.2 Mesures d'évitement et de réduction 41
3.2.3 Incidences résiduelles 42

4. Évaluation des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine 55

4.1 Incidences potentielles 56

4.1.1 Généralités 56
4.1.2 Méthode de calcul de l'exposition aux rayonnements ionisants 58
4.1.3 Incidences potentielles du projet global Cigéo 60

4.2 Mesures d'évitement et de réduction 62

4.3 Incidences résiduelles 62

4.3.1 Démarche générale d'évaluation des effets de rejets radioactifs sur la santé humaine 62
4.3.2 Émissions radioactives liquides 62
4.3.3 Émissions radioactives atmosphériques 63

5. Évaluation des incidences du stockage après fermeture sur la santé humaine 71

5.1 Incidences potentielles 72

5.2 Mesures d'évitement et de réduction 73

5.3 Incidences résiduelles 74

5.3.1 Démarche générale d'évaluation de la sûreté après fermeture 74
5.3.2 Scénarios de sûreté après fermeture retenue pour les évaluations 77
5.3.3 Exutoires, biosphères types et groupes hypothétiques retenus pour les évaluations 79
5.3.4 Les résultats des évaluations de la situation de référence de l'évolution normale de l'installation de stockage soulignent des incidences très faibles 80
5.3.5 Les résultats des évaluations des autres situations et scénarios soulignent la robustesse du stockage 81
5.3.6 Conclusion 82

6. Évaluation des incidences des situations accidentelles sur la santé humaine 85

6.1 Incidences sur la santé humaine des situations accidentelles de l'INB Cigéo 86

6.1.1 Démarche générale 86
6.1.2 Analyse des conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement 86

6.2 Incidences sur la santé humaine des situations accidentelles des autres risques du projet global Cigéo 94

6.2.1 Risques liés au transport des colis 94
6.2.2 Risques liés au transport, réception et distribution de carburants 94
6.2.3 Risques liés aux chaufferies 94
6.2.4 Risques liés aux substances dangereuses non radioactives 94
6.2.5 Risques liés aux installations/locaux électriques 94
6.2.6 Risques liés aux explosifs éventuellement mis en œuvre pour les terrassements 95

6.2.7 Risque de départ de feu de végétation lors d'un chantier 95
6.2.8 Risque de pollution des eaux souterraines lors de la création de forages/piézomètres 95

7. Synthèse des incidences du projet global Cigéo sur la santé humaine 97

7.1 Émissions physiques 98
7.1.1 Les émissions sonores 98
7.1.2 Les émissions vibratoires 98
7.1.3 Les émissions lumineuses 99
7.1.4 Les émissions olfactives 99
7.1.5 Les champs électromagnétiques 99
7.2 Émissions chimiques 99
7.2.1 Les émissions chimiques liquides 99
7.2.2 Les émissions chimiques atmosphériques 100
7.3 Émissions radioactives 100
7.3.1 Les émissions liées au transport des colis de déchets 100
7.3.2 Les effluents liquides non conventionnels issus des zones à production possible de déchets nucléaires 101
7.3.3 Les émissions radioactives atmosphériques 101
7.3.4 Risque sanitaire lié aux émissions radioactives 101
7.4 Après fermeture 102
7.5 Situations accidentelles 103
7.5.1 Situations accidentelles de l'INB Cigéo 103
7.5.2 Situations accidentelles des autres risques du projet global Cigéo 104
7.6 Conclusion 105

8. Méthodes 107

8.1 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions physiques 108
8.1.1 Méthode d'évaluation 108
8.1.2 Seuils de nuisances et recommandations pour le bruit 109
8.1.3 Seuils de nuisances et recommandations pour les vibrations 109
8.1.4 Seuils de nuisances et recommandations pour les champs électromagnétiques 110
8.2 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions chimiques 110
8.2.1 Méthode d'évaluation de l'exposition des populations 110
8.2.2 Méthode d'analyse des risques sanitaires pour une exposition par inhalation 111
8.2.3 Analyse de sensibilité de l'évaluation aux incertitudes 112
8.2.4 Conclusion 113
8.3 Méthodes d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions radiologiques 114
8.3.1 Méthode d'évaluation de l'exposition humaine 114
8.3.2 Analyse de sensibilité de l'évaluation aux incertitudes 119
8.3.3 Conclusion 120
8.4 Méthodes d'évaluation des incidences après fermeture sur la santé humaine 121
8.4.1 L'analyse des risques et incertitudes 121
8.4.2 Conceptualisation des scénarios et les outils de l'évaluation quantitative 123
8.4.3 La vérification des performances du système de stockage et de sa robustesse 124
8.4.4 L'évaluation des incidences sur l'homme 125
8.5 Méthode d'évaluation des incidences des situations accidentelles sur la santé humaine 126
8.5.1 Les objectifs de protection pour l'évaluation des impacts sur l'homme 126
8.5.2 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine 127

Annexes 129

Annexe 1 Évaluation des risques sanitaires spécifiques aux poussières de verses 130
Annexe 2 Données, hypothèses et résultats des calculs dosimétriques réalisés avec le logiciel CERES® 134
2.1 Filiations des radionucléides prises en compte dans les calculs 134
2.2 Facteurs de transfert des radionucléides dans l'environnement 134
2.3 Ration alimentaire des animaux 136
2.4 Caractéristiques des cultures 136
2.5 Caractéristiques des sols 136
2.6 Conditions météorologiques 137

Tableau de traçabilité des principales évolutions de l'étude d'impact 143

Tables des illustrations 151

Références bibliographiques 155

Préambule

L'étude d'impact du « projet global Cigéo » est constituée de sept volumes pour l'étude elle-même et d'un résumé non technique de ces sept volumes.

	ÉTUDE D'IMPACT	
RNT	Résumé non technique de l'étude d'impact	
VOLUME I	Introduction et contexte réglementaire	
VOLUME II	Justification et description du projet global Cigéo	
VOLUME III	État actuel de l'environnement et facteurs susceptibles d'être affectés par le projet	
	Partie 1 : chapitres 1 à 4	1 - Méthodologie d'analyse de l'état initial/2 - Atmosphère/3 - Sol/4 - Sous-sol
	Partie 2 : chapitre 5	5 - Eaux
	Partie 3 : chapitre 6	6 - Biodiversité et milieu naturel (partie 1)
	Partie 4 : chapitre 6	6 - Biodiversité et milieu naturel (partie 2)
	Partie 5 : chapitres 7 à 13	7 - Population, emploi, activités économiques et habitat/8 - Activités agricoles et sylvicoles/ 9 - Réseaux/10 - Déchets radioactifs et conventionnels/11 - Risques/ 12 - Infrastructures de transport/13 - Cadre de vie
	Partie 6 : chapitres 14 à 17	14 - Paysage, patrimoine culturel, tourisme et activités de loisirs/15 - Planification territoriale et aménagement du territoire/16 - Interactions entre les différents milieux de l'environnement/ 17 - Synthèse des facteurs susceptibles d'être affectés par le projet global Cigéo et hiérarchisation des enjeux
	Partie 7	Annexes au volume III (en 3 parties)
VOLUME IV	Évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences	
	Partie 1 : chapitres 1 à 4	1 - Méthodologie d'analyse des incidences/2 - Atmosphère/3 - Sol/4 - Sous-sol
	Partie 2 : chapitre 5	5 - Eaux
	Partie 3 : chapitre 6	6 - Biodiversité et milieu naturel
	Partie 4 : chapitres 7 à 13	7 - Emploi, activités économiques, population et habitat/8 - Activités agricoles et sylvicoles/ 9 - Réseaux/10 - Déchets radioactifs et conventionnels/11 - Risques/12 - Infrastructures de transport/13 - Cadre de vie
	Partie 5 : chapitres 14 à 16	14 - Paysage, patrimoine culturel, tourisme et activités de loisirs/15 - Planification territoriale et aménagement du territoire (y compris urbanisme) - Compatibilité avec les documents de planification territoriale/16 - Interactions et effets cumulés
	Partie 6 : chapitres 17 à 22	17 - Meilleures techniques disponibles/18 - Incidences des opérations de démantèlement et de fermeture et incidences après fermeture définitive/19 - Nature et modalités de suivi des mesures environnementales et de surveillance/20 - Estimation des dépenses liées aux mesures prises pour l'environnement/21 - Évolution de l'environnement en cas de mise en œuvre du projet et en son absence/22 - Synthèse des incidences du projet global Cigéo sur l'environnement
	Partie 7	Annexes au volume IV

	ÉTUDE D'IMPACT	
VOLUME V	Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000	
VOLUME VI	**Évaluation des incidences sur la santé humaine**	
VOLUME VII	Partie 1	Présentation des méthodes de réalisation de l'étude d'impact (chapitres 1 à 6)
	Partie 2	Présentation des méthodes de réalisation de l'étude d'impact (chapitres 7 à 18)

Ce **volume VI** est consacré à la présentation de l'évaluation des incidences des émissions liées aux activités du projet global Cigéo sur la santé des populations environnantes.

Le projet global Cigéo peut être à l'origine d'émissions physiques (bruit, vibrations, champs électriques et magnétiques…), chimiques (effluents atmosphériques et liquides) et radioactives (effluents atmosphériques et liquides) lors de ses phases d'aménagements préalables, de construction initiale et de fonctionnement).

Une fois le centre de stockage définitivement fermé, l'ensemble de l'installation souterraine (y compris les liaisons surface-fond) sera remblayé et l'installation nucléaire de surface sera démantelée. Les autres activités en surface seront fortement réduites, essentiellement liées à la surveillance du site et de l'environnement.

Le stockage des colis dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien permet de répondre à l'objectif de protection après fermeture, à très long terme, de manière passive, c'est-à-dire sans intervention de l'homme, en raison des propriétés remarquables de cette formation et des dispositions de conception qui permettent de tirer parti de ces propriétés (cf. Chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact). Située à environ 500 mètres de profondeur, et ainsi protégée vis-à-vis des activités humaines et des événements naturels en surface sur le très long terme (notamment l'érosion), la formation argileuse du Callovo-Oxfordien qui s'est déposée il y a environ 160 millions d'années présente une faible perméabilité à l'eau et de fortes capacités de rétention de la très grande majorité des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets HA et MA-VL.

Les évaluations des incidences sur la santé humaine du projet global Cigéo sont détaillées successivement dans le présent volume, au chapitre 1.2.5 du présent volume pour les émissions physiques, au chapitre 3 du présent volume pour les émissions chimiques, au chapitre 4 du présent volume pour les émissions radioactives, au chapitre 5 du présent volume pour l'après fermeture et au chapitre 6 du présent volume pour les situations accidentelles. Une synthèse des incidences sur la santé humaine est présentée au chapitre 7 du présent volume.

Les méthodes détaillées d'évaluation des incidences sur la santé humaine sont présentées au chapitre 8 du présent volume.

Dans le cadre des actualisations successives de l'étude d'impact accompagnant les demandes d'autorisation des différentes opérations du projet global Cigéo, des chapitres spécifiques aux opérations dont l'autorisation est demandée sont ajoutés au sein de l'étude d'impact. Ces chapitres permettent d'identifier facilement les opérations objets de l'autorisation en question et contiennent des précisions sur les incidences desdites opérations.

Ainsi, le volume VI relatif à l'évaluation des incidences sur la santé humaine propose une analyse à deux échelles :

- à l'échelle du projet global ;
- à l'échelle des opérations objets de la demande d'autorisation au travers les chapitres spécifiques ajoutés « Incidences et mesures spécifiques aux premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale ».

L'approche à l'échelle du projet global tient compte de l'ensemble des opérations qui composent le projet global Cigéo, en fonction de leur stade d'avancement, ce qui inclut effectivement les opérations objets de la présente demande d'autorisation.

ÉTUDE D'IMPACT ET PROJET GLOBAL CIGÉO

La version initiale de l'étude d'impact du projet global Cigéo (EI-DUP) a été jointe au dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, déclaration délivrée par le décret n° 2022-993 du 7 juillet 2022 (2) :

- une première actualisation (EI-DAC1) a été réalisée pour le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo, déposé le 16 janvier 2023 et dont la recevabilité a été confirmée le 22 juin 2023 par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), engageant ainsi le démarrage de l'instruction du dossier ;
- une deuxième actualisation (EI-DR0) a été jointe au dossier de demande d'autorisation environnementale et aux dossiers de demande d'autorisation d'urbanisme (permis de construire, déclarations préalables), pour des demandes concernant les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale - dénommées DR0. Ces demandes ont été déposées le 6 mars 2024 et les autorisations ont été délivrées les 11, 21 et 22 juillet 2025. Cette deuxième actualisation de l'étude d'impact est disponible sur le site de l'Andra[1].

L'étude d'impact (EI-DAC3) jointe à la version du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo et en vue de l'enquête publique, prend donc en compte, outre les éléments figurant déjà dans l'actualisation réalisée en vue du dépôt du dossier de DAC :

- l'actualisation réalisée dans le cadre des demandes d'autorisation concernant les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale - dénommées DR0 et intégrant notamment le meilleur état disponible de description des travaux objet de ces demandes. Leurs incidences sont intégrées au projet global Cigéo ;
- la mise à jour de l'EI-DAC2 réalisée en vue des consultations règlementaires, incluant la saisine de l'autorité environnementale (qui a rendu son avis le 18 décembre 2025) dans le cadre de l'instruction du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo. Cette mise à jour comprend les évolutions de connaissances sur certaines composantes du projet ou de l'environnement, les évolutions réglementaires, l'évolution de l'inventaire de réserve en cohérence avec les orientations alors disponibles pour la troisième PPE, ainsi que des éléments apportés en cours d'instruction technique (des précisions et des engagements avec échéance avant la fin de l'instruction technique) ;
- une mise à jour postérieure aux consultations réglementaires pour intégrer des précisions notamment relatives à la troisième Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE3) publiée en février 2026 ainsi qu'à l'édition 2026 des essentiels de l'inventaire national. Cette mise à jour n'a pas nécessité de reprise de l'étude d'impact en lien avec l'avis de l'Autorité environnementale. Le mémoire en réponse à cet avis ainsi que le suivi des engagements de l'Andra sont consultables dans la pièce 18 du présent dossier.

Les évolutions entre ces versions sont rendues visibles pour le lecteur et les services instructeurs afin qu'ils puissent avoir connaissance des modifications par rapport aux versions de l'étude d'impact instruites et portées à la connaissance du public. Dans le texte, une bordure verte met en exergue toutes les évolutions depuis l'étude d'impact initiale (EI-DUP) liées aux deux actualisations EI-DAC1 et EI-DR0 évoquées précédemment. Une bordure bleue met en exergue les mises à jour réalisées postérieurement au dépôt des dossiers du jalon DR0 en vue des consultations règlementaires de la procédure d'autorisation de création (EI-DAC2). Un surlignage gris met en exergue les évolutions depuis les consultations réglementaires, constituant la mise à jour EI-DAC3. Le détail de ces évolutions est présenté dans le chapitre 3 du volume I de la présente étude d'impact.

L'étude d'impact identifie et apprécie les incidences sur l'environnement du projet global Cigéo, qui comprend le centre de stockage Cigéo et l'ensemble des opérations (activités, installations, ouvrages, travaux et aménagements) nécessaires à sa réalisation et à son exploitation, dont l'installation nucléaire de base (INB). Ces opérations sont menées par l'Andra et par d'autres maîtres d'ouvrage.

En raison de la nature et de la dimension du centre de stockage Cigéo, ses incidences sur l'environnement constituent la part majeure des incidences du projet global Cigéo, même si les opérations des autres maîtres d'ouvrage sont également susceptibles d'avoir des incidences sur l'environnement.

À ce stade, les opérations des autres maîtres d'ouvrage liées au fonctionnement du centre de stockage Cigéo ne sont pas aux mêmes stades d'avancement de leur conception et de leurs processus de concertation et de validation. L'analyse de leurs incidences est donc proportionnée à leur stade d'avancement respectif.

La présente étude d'impact sera ultérieurement réactualisée dans l'hypothèse où tout ou partie des incidences du projet sur l'environnement n'auraient pu être complètement identifiées ou appréciées avant l'octroi d'une autre autorisation requise dans le cadre du projet global Cigéo, conformément à l'article L. 122-1-1 du code de l'environnement.

Ce processus de réactualisation prévu par la loi permet de garantir la qualité de l'évaluation des incidences environnementales des projets complexes tels que le projet global Cigéo, en lien avec les précisions apportées à sa conception et sa réalisation.

[1] https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference (3).

1

Populations les plus proches du projet global Cigéo

1.1 Au niveau du centre de stockage Cigéo 8
1.2 Au niveau des opérations des autres MOA 8

Le projet global Cigéo s'implante en majorité dans un environnement rural faiblement peuplé. Les données socio-économiques caractérisant l'état initial de la population, de l'emploi, des activités économiques et de l'habitat en relation avec l'implantation du projet global Cigéo sont présentées au chapitre 7 du volume III de la présente étude d'impact.

L'analyse est réalisée à l'échelle des aires d'études suivantes :

- aire d'étude immédiate associée au centre de stockage Cigéo, à la ligne ferroviaire 027000, aux variantes pour l'implantation de la route départementale D60/960, aux opérations d'alimentation en électricité du centre de stockage et aux opérations de surveillance et de caractérisation environnementale ;
- aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV Houdreville - Méry.

Comme présenté dans le volume VII de la présente étude d'impact, deux autres aires d'étude ont également été définies : une aire d'étude rapprochée et une aire d'étude éloignée (communes aux infrastructures de transport). Cependant, ces deux aires d'étude sont associées à des opérations non complètement définies à ce jour, respectivement à l'opération d'adduction d'eau et aux opérations d'expédition et de transport des colis de déchets radioactifs depuis les sites des producteurs, toutes deux définies seulement par leurs fonctionnalités (cf. Chapitre 4.3 du volume II de la présente étude d'impact). C'est pourquoi l'analyse n'est à ce stade pas réalisée à leur échelle, des compléments seront apportés ultérieurement. Pour ce faire, l'étude d'impact sera actualisée dans le cadre des procédures environnementales les concernant. Une analyse par opération est présentée ci-après.

1.1 Au niveau du centre de stockage Cigéo

Les lieux de vie présents à proximité de la zone d'intervention potentielle du centre de stockage Cigéo sont principalement des établissements recevant du public (ERP) et des habitations, fermes isolées ou villages.

Sur la partie sud de l'aire d'étude immédiate, l'ERP accueillant des populations vulnérables le plus proche du centre de stockage est l'école d'Échenay. Elle se trouve toutefois en dehors de l'aire d'étude immédiate. Les autres ERP recensés dans la partie sud de l'aire d'étude immédiate sont :

- à Bure : l'hôtel restaurant du Bindeuil, la boulangerie, la salle des fêtes, les archives EDF et le bâtiment d'accueil du public, l'espace technologique et l'Écothèque de l'Andra ;
- les mairies d'Horville, Saudron et Gillaumé ;
- la salle communale et la bibliothèque de Mandres-en-Barrois, en limite de l'aire d'étude immédiate.

Quelques fermes isolées sont recensées sur la partie sud de l'aire d'étude immédiate sur commune de Bure ; la ferme du Cité et la ferme Griffon Pré ; elles ne sont toutefois plus exploitées, mais elles peuvent être habitées de façon temporaire.

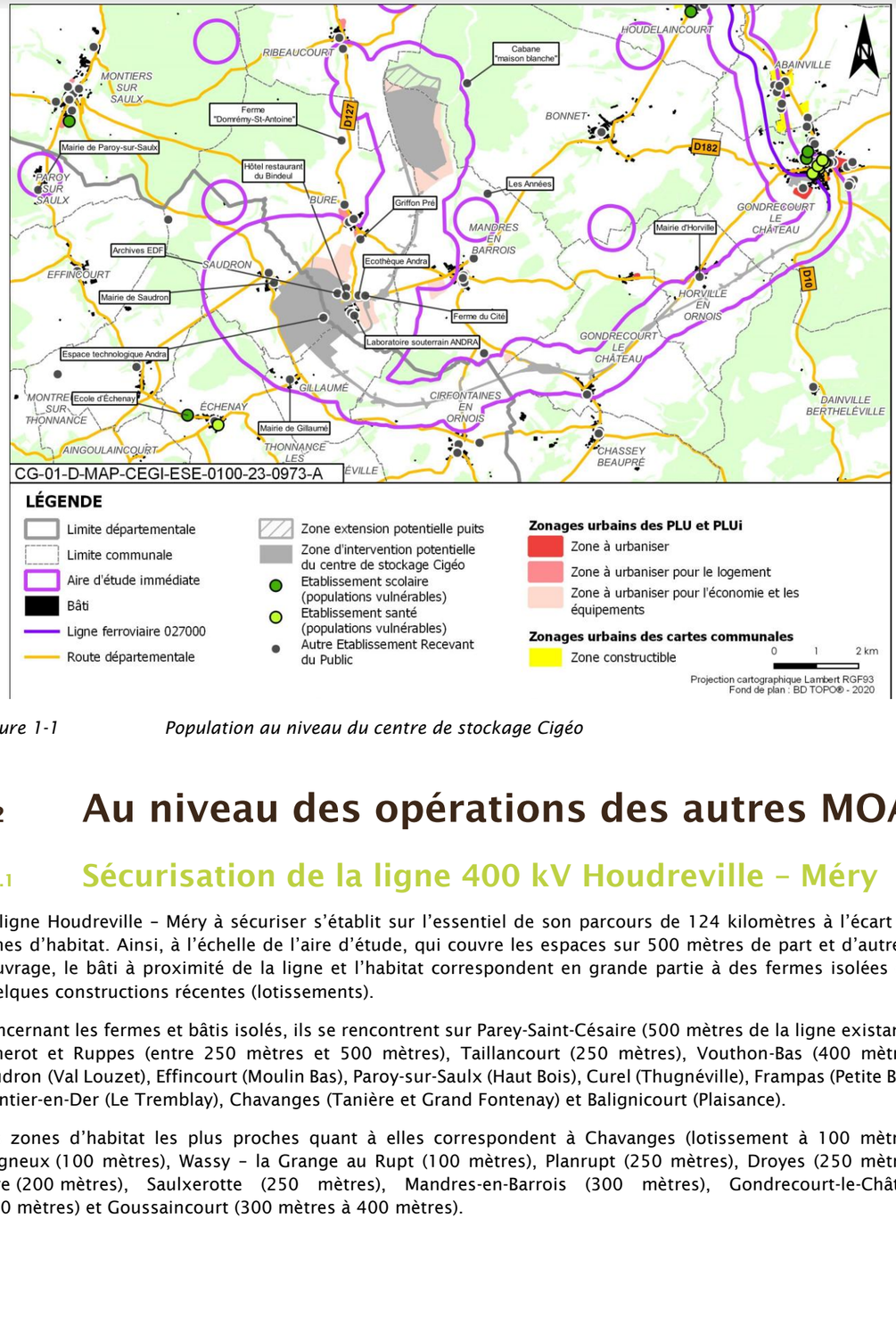


Figure 1-1 Population au niveau du centre de stockage Cigéo

1.2 Au niveau des opérations des autres MOA

1.2.1 Sécurisation de la ligne 400 kV Houdreville – Méry

La ligne Houdreville – Méry à sécuriser s'établit sur l'essentiel de son parcours de 124 kilomètres à l'écart des zones d'habitat. Ainsi, à l'échelle de l'aire d'étude, qui couvre les espaces sur 500 mètres de part et d'autre de l'ouvrage, le bâti à proximité de la ligne et l'habitat correspondent en grande partie à des fermes isolées et à quelques constructions récentes (lotissements).

Concernant les fermes et bâtis isolés, ils se rencontrent sur Parey-Saint-Césaire (500 mètres de la ligne existante), Punerot et Ruppes (entre 250 mètres et 500 mètres), Taillancourt (250 mètres), Vouthon-Bas (400 mètres), Saudron (Val Louzet), Effincourt (Moulin Bas), Paroy-sur-Saulx (Haut Bois), Curel (Thugnéville), Frampas (Petite Brie), Montier-en-Der (Le Tremblay), Chavanges (Tanière et Grand Fontenay) et Balignicourt (Plaisance).

Les zones d'habitat les plus proches quant à elles correspondent à Chavanges (lotissement à 100 mètres), Magneux (100 mètres), Wassy – la Grange au Rupt (100 mètres), Planrupt (250 mètres), Droyes (250 mètres), Bure (200 mètres), Saulxerotte (250 mètres), Mandres-en-Barrois (300 mètres), Gondrecourt-le-Château (350 mètres) et Goussaincourt (300 mètres à 400 mètres).

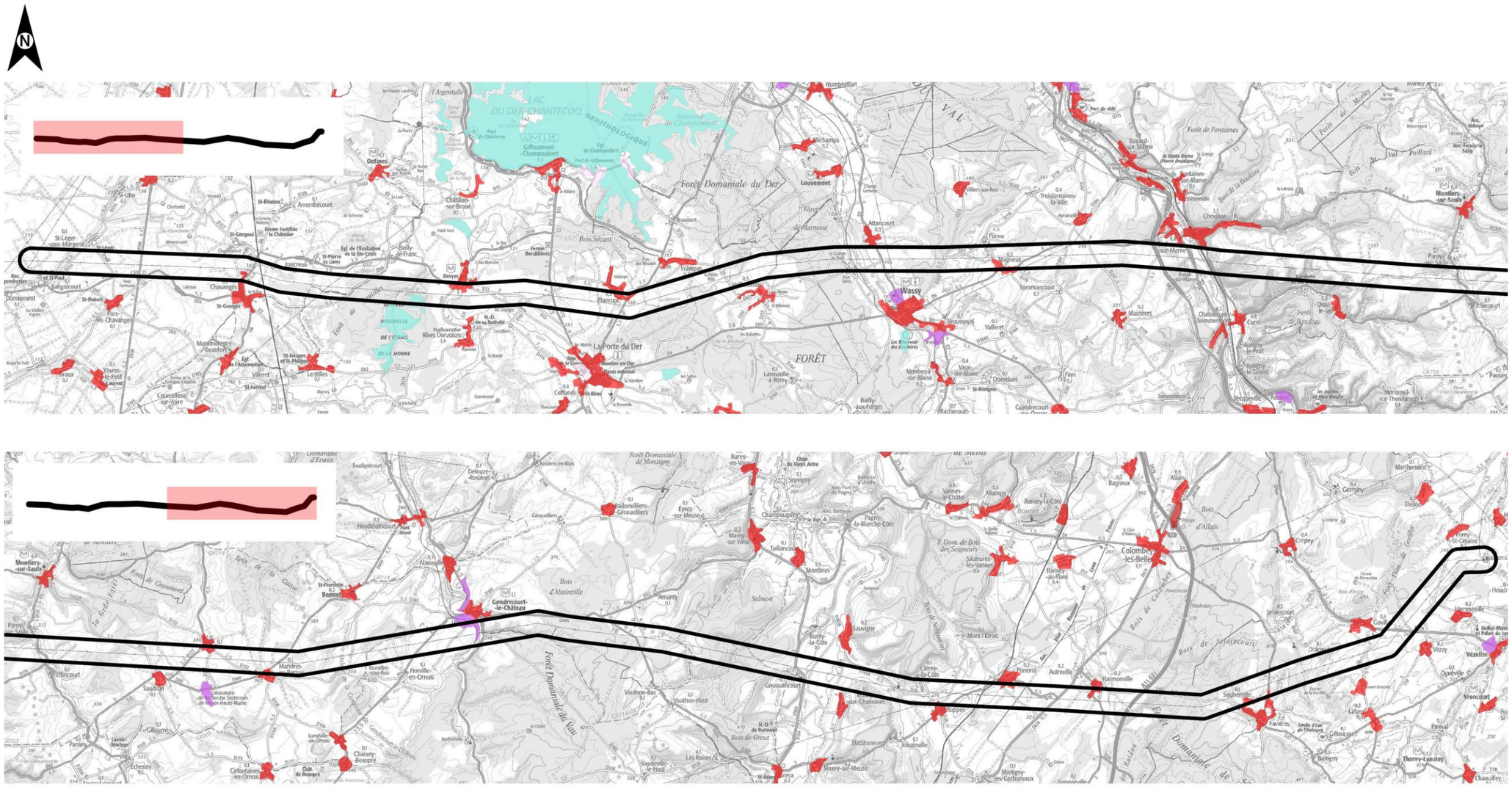


Figure 1-2 Population au sein de l'aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV

1.2.2 Adduction d'eau

L'opération d'adduction d'eau étant non complètement définie à ce jour, des compléments seront apportés ultérieurement.

1.2.3 Mise à niveau de la voie ferrée 027000

La voie ferrée 027000 existante traverse les zones urbanisées de Tronville-en-Barrois, Velaine, Ligny-en-Barrois, Tréveray, Saint-Joire, Demange-Baudignécourt et Gondrecourt-le-Château.

En lien avec la traversée de ces zones urbaines, des ERP accueillant des populations vulnérables (établissements scolaires et établissements de santé) sont recensés notamment dans la partie nord de l'aire d'étude immédiate.

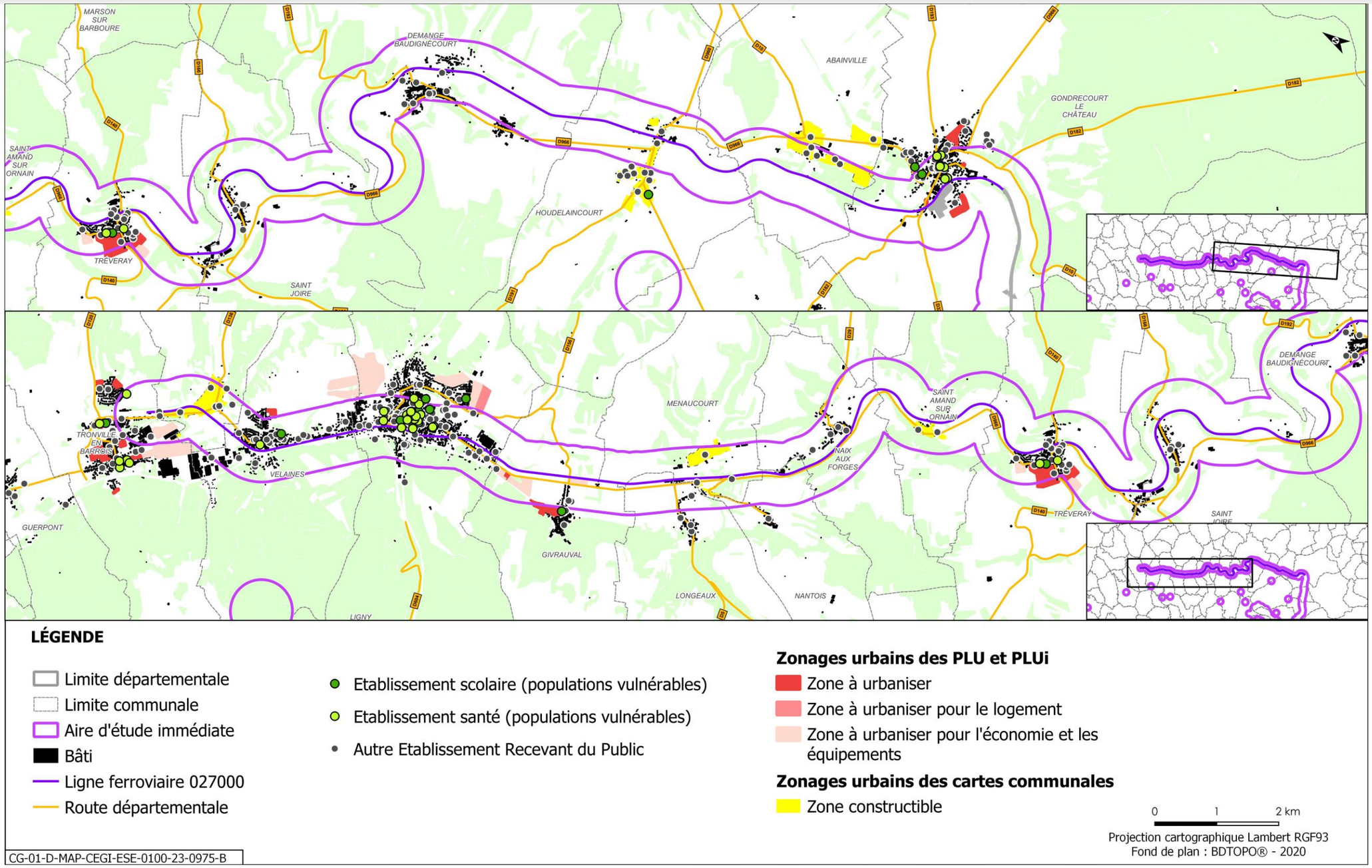


Figure 1-3 *Population le long de la voie ferrée 027000*

1.2.4 Déviation de la route départementale D60/960

La déviation de la route départementale D60/960 permet de rétablir la section de route départementale (RD) incluse dans la zone descenderie du centre de stockage Cigéo en créant une déviation de contournement du centre de stockage Cigéo pour préserver la fonctionnalité de la route. Cette opération réalisée sous la maîtrise d'ouvrage du conseil départemental de la Haute-Marne a fait l'objet d'une concertation préalable du 31 janvier 2022 au 11 mars 2022, dont le bilan a été publié le 11 avril 2022 (3). À la suite de cette première concertation, le conseil départemental a abandonné l'idée d'un contournement par le sud et s'est engagé à poursuivre les études sur deux options nord : l'option 1 « tracé de proximité » et l'option 2 bis « tracé élargi au nord » (cf. figure ci-après).

Au cours d'une seconde concertation, les avancées du projet ont été présentées :

- aux élus et agriculteurs potentiellement impactés par le projet lors d'une réunion dédiée le 20 avril 2023 ;
- au grand public sous forme dématérialisée du 15 mai 2023 au 16 juin 2023.

À l'issue de ces consultations, est retenue l'option 1 dite « de proximité », considérée comme plus pratique, avec moins d'incidence sur le foncier et un coût moins important. Ce choix de tracé a été acté par délibération des assemblées départementales de Haute-Marne et de Meuse. Le conseil départemental de la Haute-Marne poursuivra, d'une part, l'étude de ce tracé en tenant compte des résultats de la concertation, et, d'autre part, le dialogue sur cette opération jusqu'à l'enquête publique relative aux autorisations associées.

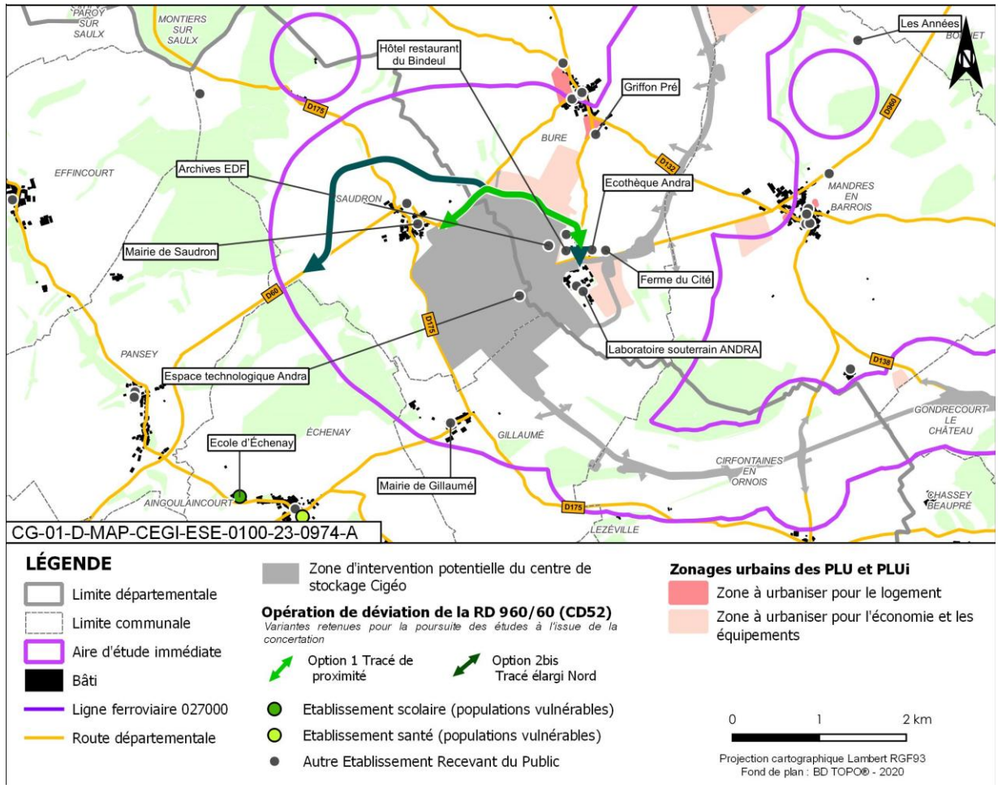


Figure 1-4 *Population au niveau de la déviation de la route départementale D60/960, tracé de proximité retenu*

1.2.5 Expédition et transport des colis de déchets radioactifs

L'opération étant non complètement définie à ce jour, des compléments seront apportés ultérieurement.

2

Évaluation des incidences liées aux émissions physiques sur la santé humaine

2.1 Évaluation des incidences liées aux émissions sonores sur la santé humaine 14

2.2 Évaluation des incidences liées aux émissions vibratoires sur la santé humaine 22

2.3 Évaluation des incidences liées aux émissions lumineuses sur la santé humaine 23

2.4 Évaluation des incidences liées aux émissions olfactives sur la santé humaine 24

2.5 Évaluation des incidences liées aux champs électromagnétiques sur la santé humaine 25

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions sonores, vibratoires, lumineuses, olfactives, champs électriques et magnétiques pendant ses phases d'aménagements préalables, de construction initiale puis de fonctionnement. Ces émissions se propageant dans l'air et/ou le sol, diminuent significativement avec la distance d'éloignement, et encore plus rapidement si des mesures de réduction sont mises en place.

2.1 Évaluation des incidences liées aux émissions sonores sur la santé humaine

Les niveaux sonores actuels mesurés dans l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo (incluant les lieux de vie présents à proximité du projet) sont variables. Ils sont globalement compris entre (de l'ordre de) 40 dB(A) et 60 dB(A) en période diurne, et entre (de l'ordre de) 30 dB(A) et 60 dB(A) en période nocturne (cf. Chapitre 13 du volume III de la présente étude d'impact). Ces niveaux sonores diurnes et nocturnes sont notamment liés aux activités agricoles dans les champs et au trafic routier sur les différents axes (y compris à proximité des futures composantes du centre de stockage Cigéo, l'installation terminale embranchée et de la ligne ferroviaire 027000).

2.1.1 Incidences potentielles

Le bruit peut entraîner des effets sur la santé humaine tels que de la gêne, du stress, de l'hypertension ou des troubles du sommeil (diminution de la durée du sommeil, réveils, baisse de la qualité du sommeil, etc.) (4). À long terme, des effets secondaires sur le système cardiovasculaire ou la santé mentale peuvent être observés. Le seuil de la douleur se situe aux alentours de 120 dB(A).

Les effets du bruit sur la santé humaine ont fait l'objet de nombreuses études visant à comprendre ses modes d'action et ses mécanismes. En dépit de ces études, le bruit reste aujourd'hui une nuisance mal connue sur le plan de ses effets sur l'individu. Cette méconnaissance est notamment liée à la difficulté de mesurer les conséquences réelles (à court, moyen ou long termes) de l'agression sonore sur des organismes susceptibles de s'adapter et donc de masquer tout ou partie de ces effets. Elle est renforcée par le fait que le bruit comporte un grand nombre de composantes subjectives et qu'à ce titre, il peut être perçu de façons très différentes d'un individu à l'autre.

2.1.1.1 Généralités

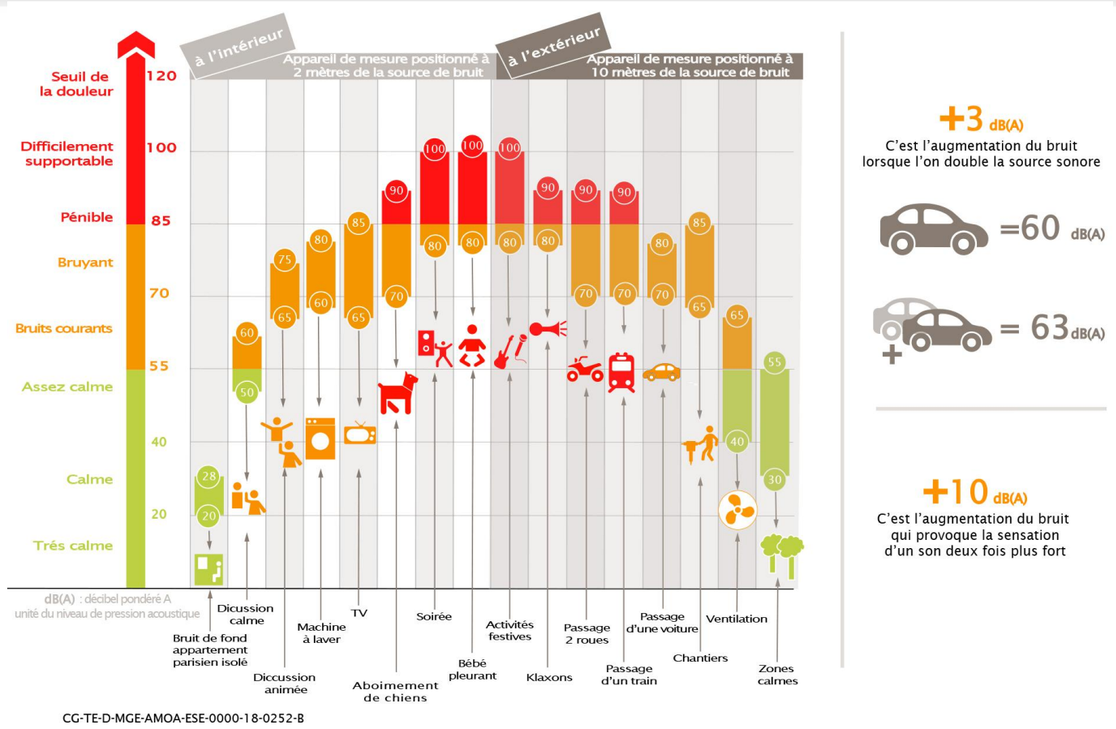
L'échelle utilisée pour caractériser les niveaux sonores s'exprime en décibel (dB(A)). Elle va de 0 dB(A), seuil de l'audition humaine, à environ 120 dB(A), limite supérieure des bruits usuels de notre environnement (5) (cf. Figure 2-1) :

- le seuil de référence 0 dB(A) correspond au silence complet (ce niveau n'est quasiment pas atteignable car le son se propageant dans l'air, il faudrait être dans une pièce sous vide ou aller dans l'espace pour obtenir un niveau de bruit de 0 dB(A)) ;
- le seuil de risque pour l'audition est de 80 dB(A), seuil à partir duquel, la durée d'exposition à la source de bruit est un facteur important de risque pour l'Homme ;
- le seuil de douleur de 120 dB(A) marque le début de la douleur pour l'Homme.

Les niveaux sonores de notre vie quotidienne sont plutôt compris entre 30 dB et 90 dB :

- en dessous de 55 dB(A), l'ambiance sonore est considérée comme calme (de très calme à assez calme) ;
- des niveaux sonores compris entre 55 dB(A) et 70 dB(A) sont assimilés à des bruits courants ;
- en revanche, une zone avec des niveaux sonores supérieurs à 70 dB(A) est considérée comme bruyante.

Les niveaux sonores situés au-delà de 90 dB(A) proviennent essentiellement de la vie professionnelle (industrie) ou de certains hobbies (musique).



CG-TE-D-MGE-AMOA-ESE-0000-18-0252-B

Figure 2-1 Échelle des niveaux sonores perçus (source : Mangaïa pour la mairie de Paris[2])

2.1.1.2 Définitions

Décibel (dB) et décibel pondéré A (dBA) : l'échelle utilisée pour caractériser les niveaux sonores s'exprime en décibel (dB). Cependant, afin de tenir compte de la perception de l'oreille humaine, on applique généralement au niveau sonore mesuré une pondération dite de type A. On parle alors de niveau sonore pondéré A, exprimé en dB(A).

Niveau de bruit résiduel : le niveau résiduel caractérise le niveau de bruit obtenu dans les conditions environnementales initiales du site, c'est-à-dire en l'absence du bruit généré par une source sonore particulière/un établissement (que l'on souhaite caractériser).

Niveau de bruit ambiant : le niveau ambiant caractérise le niveau de bruit obtenu en considérant l'ensemble des sources présentes dans l'environnement du site. En l'occurrence, ce niveau sera la somme logarithmique du bruit résiduel et du bruit particulier engendré par la source sonore particulière/l'établissement (que l'on souhaite caractériser).

Niveau sonore équivalent (LAeq) : c'est la donnée qui caractérise le mieux un bruit fluctuant dans le temps, par exemple le bruit de la circulation automobile ou ferroviaire. Il s'agit du niveau énergétique moyen pour une période donnée (entre 6 h 00 et 22 h 00 pour la période diurne et entre 22 h 00 et 6 h 00 pour la réglementation liée aux infrastructures de transport).

Émergence : c'est une modification temporelle du niveau ambiant induite par l'apparition ou la disparition d'un bruit particulier. Il s'agit de la valeur représentant l'élévation du niveau sonore (en dB(A)) engendrée par une ou plusieurs sources sonores bruyantes intégrant toutes les activités en fonctionnement (machine, industrie) ainsi que les circulations locales dans l'aire d'étude. Il s'agit de la différence arithmétique entre le bruit ambiant (installations et activités en fonctionnement) et le bruit résiduel (installations et activités à l'arrêt).

[2] https://www.paris.fr/pages/bruit-et-nuisances-sonores-162

Zone à émergence réglementée (ZER) : d'après l'arrêté du 23 janvier 1997 relatif à la limitation des bruits émis dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement (6), les zones à émergence réglementée sont constituées :

- de l'intérieur des immeubles habités ou occupés par des tiers, existant à la date de l'arrêté d'autorisation de l'installation et leurs parties extérieures éventuelles les plus proches (cour, jardin ou terrasse) ;
- des zones constructibles définies par des documents d'urbanisme opposables aux tiers et publiés à la date de l'arrêté d'autorisation ;
- de l'intérieur des immeubles habités ou occupés par des tiers qui ont été implantés après la date de l'arrêté d'autorisation, dans les zones constructibles définies ci-dessus et leurs parties extérieures éventuelles les plus proches (cour, jardin ou terrasse), à l'exclusion de celles des immeubles implantés dans les zones destinées à recevoir des activités artisanales ou industrielles.

2.1.1.3 Incidences potentielles du projet global Cigéo

Le projet global Cigéo comprend plusieurs opérations qui sont sources d'émissions de bruit (cf. Chapitre 13.1 du volume IV de la présente étude d'impact).

En phase d'aménagements préalables, les travaux de construction de la liaison intersites, de l'installation terminale embranchée, de l'alimentation électrique (postes de transformation et de livraison, liaisons enterrées, sécurisation ligne aérienne), de l'adduction d'eau, de la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et de la déviation de la route départementale D60/960 s'échelonnent sur une durée d'un à trois ans. C'est durant cette phase que les émissions de bruits sont les plus importantes pour ces opérations. Les travaux n'interviendront pas tous en même temps et ne sont pas localisés au même endroit. Les principales sources de bruit associées sont liées aux engins de chantier.

Les phases d'aménagements préalables et de construction initiale sur les zones puits et descenderie du centre de stockage Cigéo sont prévues sur une durée plus importante (une vingtaine d'années). Les sources de bruit sont plus variées, notamment les opérations de terrassement utilisant des engins de chantier et du matériel bruyant comme les marteaux-piqueurs, les opérations de chargement/déchargement des matériaux, la circulation routière et ferroviaire pour le fret et les activités de construction, telles que les tirs à l'explosif pour les terrassements et le creusement des puits, mais aussi le fonctionnement des centrales à béton.

Pendant la phase de fonctionnement, les émissions de bruit sont principalement liées au fonctionnement des ouvrages tels que les usines de ventilation, le poste de transformation électrique 400/90 kV, la centrale à béton en support aux activités de construction des alvéoles de stockage qui se poursuivent dans l'installation souterraine, et la circulation routière et ferroviaire pour les déplacements du personnel et l'acheminement des colis de déchets et matériaux.

Les incidences potentielles sur la santé, liées au bruit dû au trafic ou à l'activité industrielle du projet global Cigéo, sont essentiellement la gêne sonore ou des troubles du sommeil, principalement lorsqu'ils interviennent la nuit.

Ces incidences potentielles d'émissions sonores sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées.

2.1.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions sonores, ainsi que leurs effets attendus et modalité de suivi sont présentés dans le chapitre 13 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les principales mesures d'évitement mises en place en lien avec les émissions sonores sont détaillées au chapitre 13.1.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont les suivantes :

- E1.1b : choix d'implantation du projet global Cigéo à distance des zones urbanisées ;
- E4.2b : circulation des trains uniquement de jour (6 h – 22 h) sauf de très rares exceptions ;
- E3.2b : mise en place d'un convoyeur reliant le terminal fret de l'ITE à la ZP pour éviter le trafic routier.

La mise en place de ces mesures a pour effet d'éviter les émissions sonores nocturnes et ainsi l'exposition des populations et la gêne occasionnée.

Les principales mesures de réduction mises en place en lien avec les émissions sonores sont détaillées au chapitre 13.1.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont les suivantes :

- R2.1z : organisation globale du chantier ;
- R3.1b : interruption des travaux susceptibles de causer une gêne pour le voisinage entre 22 h et 7 h ;
- R2.1g : engins et véhicules régulièrement entretenus ;
- R2.1j : utilisation des avertisseurs sonores type « cri du lynx » ;
- R2.1j : préférence donnée aux engins les moins bruyants ;
- R2.1a : utilisation privilégiée des infrastructures ferroviaires pour l'approvisionnement des matériaux de construction et évacuation de déchets ;
- R2.1a : limitation de la vitesse maximale des trains ;
- R2.1a : circulations des poids lourds (PL) et engins de chantier à faible vitesse ;
- R2.1j : adaptation de l'armement des voies ferrées ;
- R2.2b : semelles résilientes ;
- R2.1j : merlon périphérique sud-ouest de la ZD ;
- R2.2b : conception du convoyeur reliant le terminal fret de l'ITE à la ZP pour limiter les nuisances sonores ;
- R2.1j : implantation des bâtiments bases vie de manière à limiter la propagation sonore vers les zones d'habitation ;
- R2.1j : mur anti-bruit à proximité de l'hôtel du Bindeuil ;
- R2.1j : mur anti-bruit le long des voies de circulation ouest de la zone descenderie ;
- R2.1j : mesures complémentaires permettant de limiter les nuisances sonores de certaines zones de chantier ;
- R2.1j : mise en place de protections acoustiques au niveau du poste de transformation 400/90 kV ;
- R2.1j : utilisation privilégiée des infrastructures ferroviaires pour la livraison des colis de déchets radioactifs ;
- R2.1j : installation de silencieux sur les ventilateurs d'extraction ou de soufflage.

La mise en place de ces mesures a pour objectif de réduire les émissions sonores à toutes les phases de vie du projet global Cigéo et de limiter ainsi l'exposition des populations.



Figure 2-2 Exemple de convoyeur à bande en caisson béton

2.1.3 Incidences résiduelles

La quantification des incidences liées aux émissions sonores est présentée au chapitre 13.1 du volume IV de la présente étude d'impact.

Pour chacune des phases, les valeurs présentées dans le présent chapitre sont issus des résultats de la modélisation du scénario majorant (conduisant à l'impact acoustique le plus fort). Les modélisations pourront être actualisées au regard de l'avancement des études de conception et seront présentées dans les versions ultérieures de l'étude d'impact.

La mise en œuvre des mesures d'évitement et de réduction permet d'atteindre un niveau sonore inférieur aux seuils réglementaires au niveau de toutes les habitations les plus proches et à toutes les phases du projet.

L'incidence acoustique est évaluée en limite de propriété du centre de stockage Cigéo conformément à la réglementation acoustique sur les ICPE et les INB, ainsi qu'au droit des habitations les plus proches (cf. Chapitre 13.1.3.1 Localisation des points d'étude du volume IV de la présente étude d'impact). Le niveau de bruit futur correspond au cumul entre le niveau de bruit résiduel (état initial) (cf. Chapitre 13.1.3.2 Niveaux résiduels du volume IV de la présente étude d'impact) et le bruit engendré par le projet calculé par modélisation.

Les incidences acoustiques sont analysées au regard des seuils réglementaires s'ils existent ou d'une autre référence précisée en l'absence de seuil réglementaire. En fonction des phases et des opérations étudiées, les exigences acoustiques réglementaires sont différentes. Celles-ci sont détaillées en annexe 9 du volume VII de la présente étude d'impact.

Les lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement (7) publiées par le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe en 2018, définissent des niveaux d'exposition recommandés au bruit provenant des transports (trafics routier, ferroviaire et aérien), des éoliennes et des loisirs, pour protéger la santé des populations. Les valeurs de bruit dû au trafic routier et au trafic ferroviaire en façade recommandées par l'OMS sont présentées au chapitre 8.1.2.2 du présent volume. Les composantes du projet global Cigéo concernées sont les infrastructures routières (déviation de la route départementale D60/960 et la LIS), ainsi que les infrastructures ferroviaires (ITE et ligne 027000).

Le niveau de bruit futur (période diurne et période nocturne) est également apprécié au niveau des habitations les plus proches au regard des classes d'ambiance présentées dans le tableau ci-après (ambiance très calme et ambiance modérée à bruyante) et de l'augmentation du niveau sonore selon les critères suivants :

<u>En période diurne</u> :

- inférieure à 5 dBA : émergence admissible pour la période diurne (réglementation ICPE) ;
- comprise entre 5 dBA et 10 dBA : augmentation significative du niveau sonore ;
- supérieure à 10 dBA : augmentation significative importante du niveau sonore.

<u>En période nocturne</u> :

- inférieure à 3 dbA : émergence admissible pour la période nocturne (réglementation ICPE) ;
- inférieure à 5 dBA : émergence admissible pour la période diurne (réglementation ICPE) ;
- comprise entre 5 dBA et 10 dBA : augmentation significative du niveau sonore ;
- supérieure à 10 dBA : augmentation significative importante du niveau sonore.

Tableau 2-1 Échelle d'ambiance sonore

Ambiance	Niveau de bruit futur estimé Lf en dB(A)	
	Période diurne	Période nocturne
Très calme	Lf ≤30 dB(A)	Lf ≤30 dB(A)
Calme	30 dB(A) <Lf ≤40 dB(A)	30 dB(A) <Lf ≤35 dB(A)
Assez calme	40 dB(A) <Lf ≤50 dB(A)	35 dB(A) <Lf ≤45 dB(A)
Courante	50 dB(A) <Lf ≤60 dB(A)	45 dB(A) <Lf ≤55 dB(A)
Modérée à bruyante	Lf >60 dB(A)	Lf >55 dB(A)

Les tableaux présentés ci-après présentent l'analyse des incidences acoustiques du projet global sur les habitations pour la phase d'aménagements préalables, de construction initiale et de fonctionnement.

Une étude acoustique menée par SNCF Réseau est en cours et inclut des modélisations en trois dimensions.

En ce qui concerne le poste de transformation 400/90 kV, à la suite de cette dernière phase de concertation, le processus de conception du poste doit se poursuivre. La réalisation d'une étude acoustique basée sur les choix de conception finalement retenus permettra de s'assurer du respect de la réglementation des émergences.

Dans le cadre des études de conception de la déviation de la route départementale D60/960, une étude acoustique spécifique sera réalisée.

Ces études seront intégrées aux versions actualisées ultérieures de la présente étude d'impact.

2.1.3.1 Phase d'aménagements préalables

En phase d'aménagements préalables du projet global Cigéo, les évolutions sonores sont les suivantes en période diurne :

Tableau 2-2 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en APR

Période diurne	Niveau de bruit futur estimé (Lf) en dBA			
Augmentation du niveau sonore	Lf ≤40 dBA Ambiance calme	40 dBA <Lf ≤50 dBA Ambiance assez calme	50 dBA <Lf ≤60 dBA Ambiance courante	Lf >60 dBA Ambiance modérée à bruyante
Inférieure à 5 dBA		Bure Sud Ribeaucourt	Mandres-en-Barrois	
Comprise entre 5 dBA et 10 dBA	Bure Est	Gillaumé	Saudron	
Supérieure à 10 dBA			Hôtel du Bindeuil	-

Les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 60 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Seul le niveau sonore au niveau de l'hôtel du Bindeuil augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit courante (<50 dBA).

L'incidence sur la santé est faible.

Aucun résultat n'est présenté pour la période nocturne étant donné qu'il n'est pas prévu d'activité en période nocturne en phase d'aménagements préalables.

En cas d'activité en phase d'aménagements préalables pour la période 22 h - 07 h, l'évaluation des incidences acoustiques sur cette plage horaire sera effectuée dans le cadre des demandes de dérogation effectuées dans le cadre du respect de la réglementation locale.

La cartographie présentée ci-après montre la propagation des niveaux sonores engendrés par le projet global Cigéo en APR. Les niveaux de bruit futurs au niveau des Zones à émergences Réglementées (ZER) présentés dans le tableau ci-avant sont calculés par cumul entre le niveau de bruit résiduel (état initial) et le bruit engendré par le projet calculé par modélisation.

Dès la phase d'aménagements préalables un suivi des émissions sonores du centre de stockage Cigéo est réalisé, afin de confirmer l'efficience des mesures de réduction du bruit proposées et les niveaux de bruit atteints tel que précisé dans le chapitre 19 du volume IV relatif aux modalités de suivi des mesures environnementales.

Les incidences résiduelles acoustiques sur la santé humaine du projet global Cigéo en phase d'aménagements préalables sont faibles.

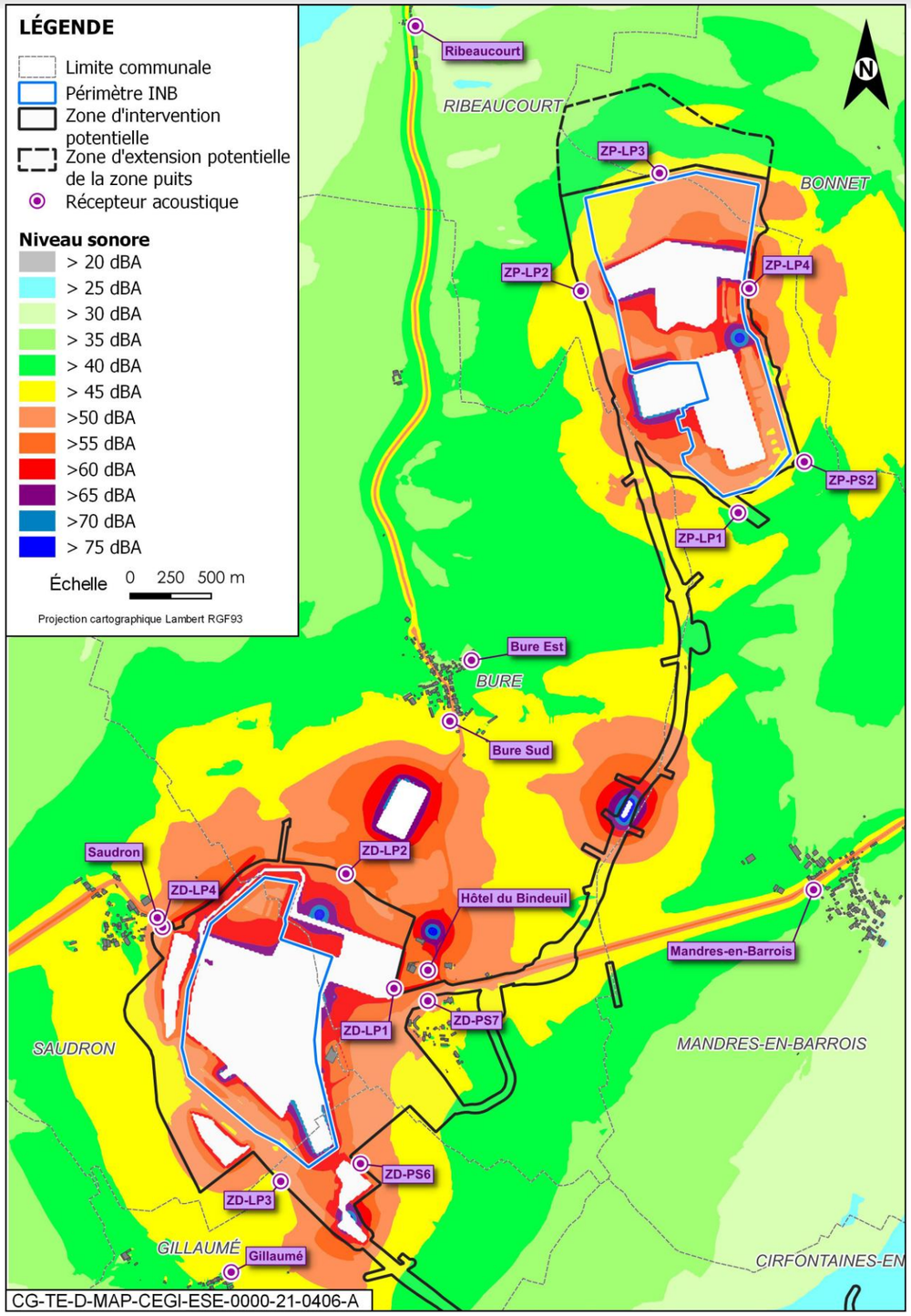


Figure 2-3 Propagation acoustique – Aménagements préalables - Toutes sources (Diurne)

2.1.3.2 Phase de construction initiale

Pour la ligne ferroviaire utilisée uniquement en période diurne pour le trafic de fret, le calcul simplifié effectué à ce stade de l'étude montre que pour un trafic de huit passages, soit quatre trains par jour (trois trains de type tombereaux pour le fret de l'Andra et un train pour le transport de céréales), aucune habitation le long de la ligne ferroviaire 027000 n'est concernée par un niveau acoustique supérieur à 63 dB(A) correspondant au seuil de bruit de jour à respecter en façade d'habitation. Une étude acoustique menée par SNCF Réseau est en cours et inclut des modélisations en trois dimensions. Elle sera intégrée à la version actualisée de la présente étude d'impact associée à l'autorisation environnementale nécessaire aux travaux de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000.

En phase de construction initiale du projet global Cigéo, les évolutions sonores en période diurne et nocturne sont les suivantes :

Tableau 2-3 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en CI - période diurne

Période diurne	Niveau de bruit futur estimé (Lf) en dBA			
Augmentation du niveau sonore	Lf ≤40 dBA Ambiance calme	40 dBA <Lf ≤50 dBA Ambiance assez calme	50 dBA <Lf ≤60 dBA Ambiance courante	Lf >60 dBA Ambiance modérée à bruyante
Inférieure à 5 dBA		Gillaumé	Mandres-en-Barrois	
Comprise entre 5 dBA et 10 dBA	Bure Est	Bure Sud Ribeaucourt	Saudron	
Supérieure à 10 dBA			Hôtel du Bindeuil	

Les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 60 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Le niveau sonore au niveau de l'hôtel du Bindeuil augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit courante (<60 dBA). Pour toutes les autres habitations l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dBA.

Tableau 2-4 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en CI - période nocturne

Période nocturne	Niveau de bruit futur estimé (Lf) en dBA			
Augmentation du niveau sonore	Lf ≤35 dBA Ambiance calme	35 dBA <Lf ≤45 dBA Ambiance assez calme	45 dBA <Lf ≤55dBA Ambiance courante	Lf >55 dBA Ambiance modérée à bruyante
Inférieure à 3 dBA	Gillaumé			
Inférieure à 5 dBA	Bure Est			
Comprise entre 5 dBA et 10 dBA		Mandres-en-Barrois Ribeaucourt	Saudron	
Supérieure à 10 dBA		Bure Sud	Hôtel du Bindeuil	

Les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 55 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Le niveau sonore au niveau de l'hôtel du Bindeuil augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit courante (<55 dBA). La commune de Bure compte quelques habitations (habitations situées au sud) dont le niveau sonore augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit assez calme (<45 dBA).

Pour toutes les autres habitations, l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dBA.

L'incidence sur la santé est faible.

Par ailleurs, les niveaux acoustiques de toutes les opérations du projet global Cigéo sont inférieurs aux seuils réglementaires applicables en période diurne et nocturne.

Pour l'ITE, les niveaux sonores liés au trafic ferroviaire restent en dessous de la recommandation de l'OMS de 54 dBA sur l'indice Lden (pas de trafic ferroviaire la nuit). Pour la LIS, les niveaux sonores liés au trafic routier restent en dessous de la recommandation de l'OMS de 53 dBA sur l'indice Lden et 45 dBA sur l'indice Lnight. Les études acoustiques spécifiques pour la ligne 027000 et pour la déviation de la route départementale D60/960 seront intégrées aux versions actualisées ultérieures de la présente étude d'impact.

Les cartographies présentées ci-après montrent la propagation des niveaux sonores engendrés par le projet global Cigéo en phase de construction initiale, respectivement en période diurne et nocturne. Les niveaux de bruit futurs au niveau des Zones à émergences Réglementées (ZER) présentés dans le tableau ci-avant sont calculés par cumul entre le niveau de bruit résiduel (état initial) et le bruit engendré par le projet calculé par modélisation.

Le suivi des émissions sonores du centre de stockage Cigéo mis en place pendant les aménagements préalables se poursuit en phase construction initiale, afin de confirmer l'efficience des mesures de réduction du bruit proposées et le respect de la conformité réglementaire (en termes de niveau de bruit atteint), cf. Chapitre 19 du volume IV relatif aux modalités de suivi des mesures environnementales.

Les incidences résiduelles acoustiques sur la santé humaine du projet global Cigéo en phase de construction initiale sont faibles.

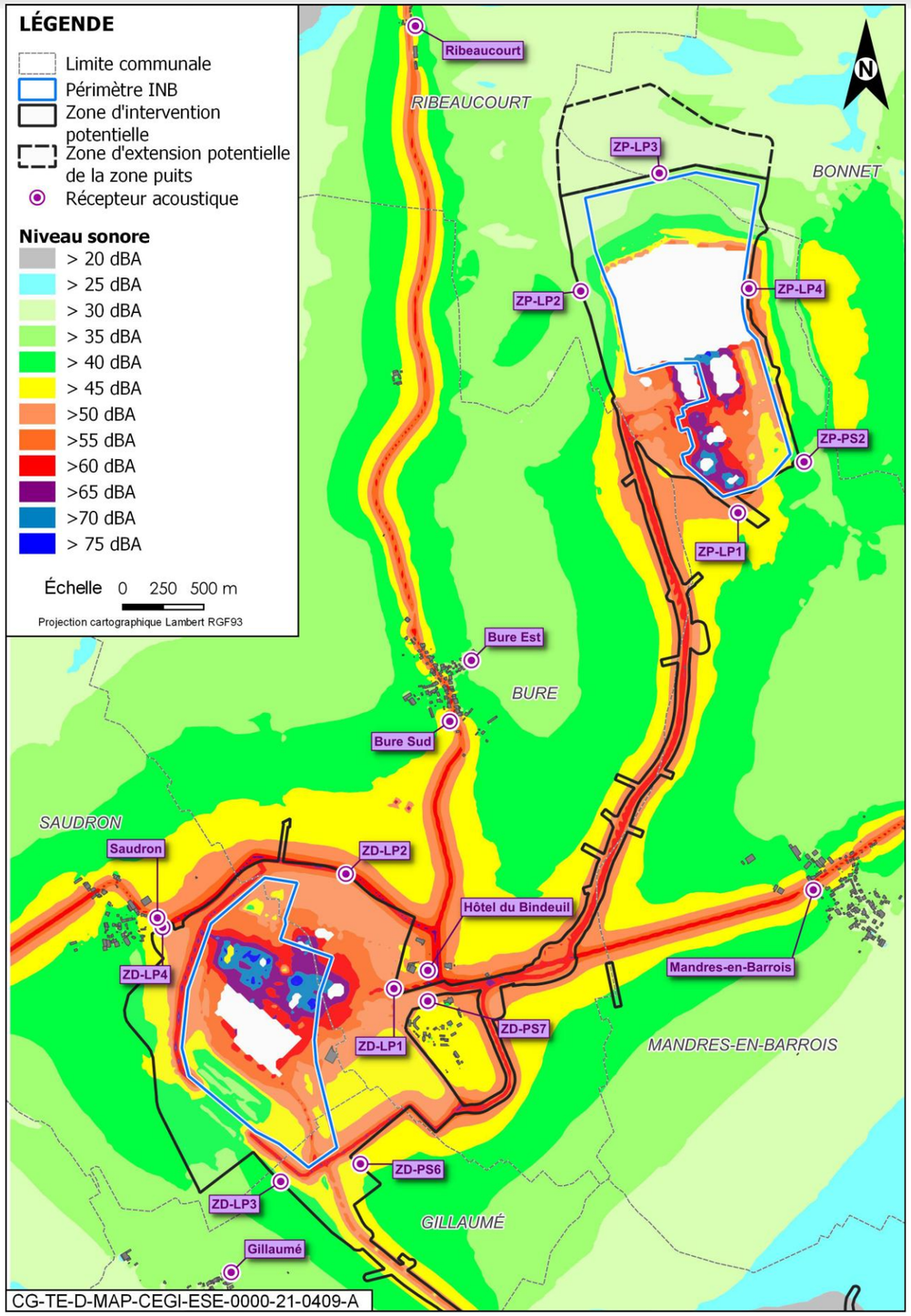


Figure 2-4 *Propagation acoustique - Construction initiale - Toutes sources (diurne)*

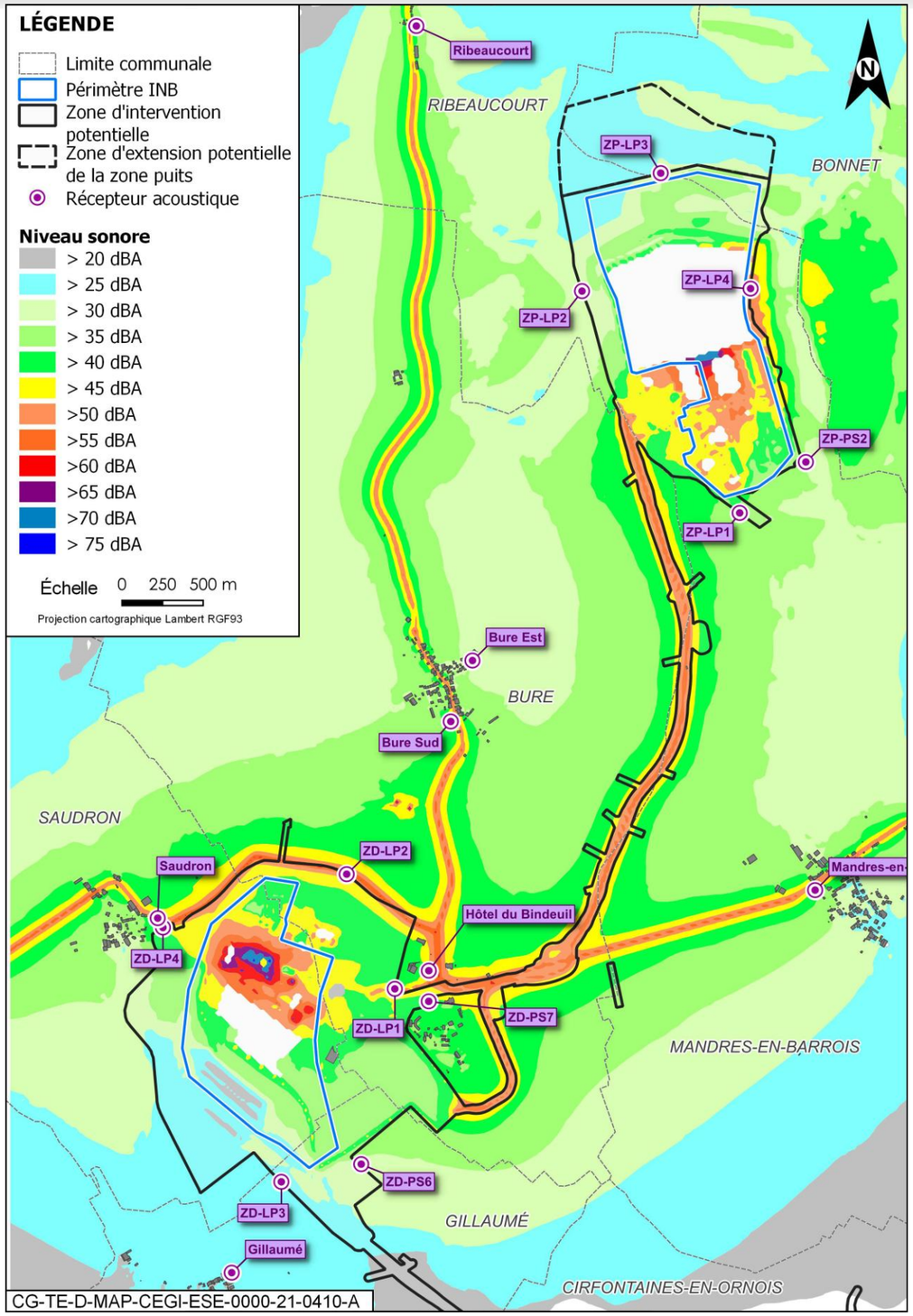


Figure 2-5 *Propagation acoustique - Construction initiale - Toutes sources (nocturne)*

2.1.3.3 Phase de fonctionnement

Pour la ligne ferroviaire 027000, une évaluation acoustique simplifiée a démontré (cf. Chapitre précédent) qu'aucune habitation ne dépassait le seuil de 63 dB(A) durant la phase de construction initiale avec huit passages de trains par jour. En phase de fonctionnement le trafic lié au projet global Cigéo étant réduit à deux trains par jour (quatre passages/jours) pour les besoins de l'Andra et deux trains pour des céréaliers (quatre passages/jours), aucune habitation ne sera donc concernée par un dépassement de seuil de 63 dB(A). La ligne ferroviaire 027000 est utilisée très exceptionnellement de nuit pour le transport de colis de déchets radioactifs, néanmoins le seuil de 58 dB(A) ne sera pas dépassé. Une étude acoustique menée par SNCF Réseau est en cours et inclut des modélisations en trois dimensions. Elle sera intégrée à la version actualisée de la présente étude d'impact associée à l'autorisation environnementale nécessaire aux travaux de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000.

En phase de fonctionnement du projet global Cigéo, les évolutions sonores en période diurne et nocturne sont les suivantes :

Tableau 2-5 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en F - période diurne

Période diurne	Niveau de bruit futur estimé (Lf) en dBA			
Augmentation du niveau sonore	**Lf ≤40 dBA Ambiance calme**	**40 dBA <Lf ≤50 dBA Ambiance assez calme**	**50 dBA <Lf ≤60 dBA Ambiance courante**	**Lf >60 dBA Ambiance modérée à bruyante**
Inférieure à 5 dBA		Gillaumé Ribeaucourt	Saudron Mandres-en-Barrois	
Comprise entre 5 dBA et 10 dBA	Bure Est	Bure Sud	Hôtel du Bindeuil	
Supérieure à 10 dBA				

Les niveaux de bruit futur engendré par le projet global Cigéo sont inférieurs à 60 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Par ailleurs, l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dBA, pour toutes les habitations de l'aire d'étude, ce qui est une amélioration de l'ambiance acoustique par rapport à la phase de construction initiale en période diurne. L'incidence sur la santé est faible.

Tableau 2-6 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en F - période nocturne

Période nocturne	Niveau de bruit futur estimé (Lf) en dBA			
Augmentation du niveau sonore	**Lf ≤35 dBA Ambiance calme**	**35 dBA <Lf ≤45 dBA Ambiance assez calme**	**45 dBA <Lf ≤55 dBA Ambiance courante**	**Lf >55 dBA Ambiance modérée à bruyante**
Inférieure à 3 dBA	Gillaumé			
Inférieure à 5 dBA		Ribeaucourt		
Comprise entre 5 dBA et 10 dBA	Bure Est	Mandres-en-Barrois Bure sud	Saudron Hôtel du Bindeuil	
Supérieure à 10 dBA				

Les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 55 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Par ailleurs, l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dbA, pour toutes les habitations de l'aire d'étude, ce qui est une amélioration de l'ambiance acoustique par rapport à la phase de construction initiale en période diurne. L'incidence sur la santé est faible.

Par ailleurs, les niveaux acoustiques de toutes les opérations du projet global Cigéo sont inférieurs aux seuils réglementaires applicables en période diurne et nocturne.

En ce qui concerne l'ITE, les niveaux sonores liés au trafic ferroviaire restent en dessous de la recommandation de l'OMS de 54 dBA sur l'indice Lden. Pour la LIS, les niveaux sonores liés au trafic routier restent en dessous de la recommandation de l'OMS de 53 dBA sur l'indice Lden et 45 dBA sur l'indice Lnight. Les études acoustiques spécifiques pour la ligne 027000 et pour la déviation de la route départementale D60/960 seront intégrées aux versions actualisées ultérieures de la présente étude d'impact.

Les cartographies présentées ci-après montrent la propagation des niveaux sonores engendrés par le projet global Cigéo en phase de fonctionnement, respectivement en période diurne et nocturne. Les niveaux de bruit futurs au niveau des Zones à émergences Réglementées (ZER) présentés dans le tableau ci-avant sont calculés par cumul entre le niveau de bruit résiduel (état initial) et le bruit engendré par le projet calculé par modélisation.

Le suivi des émissions sonores du centre de stockage Cigéo mis en place pendant les phases d'aménagements préalables et de construction initiale se poursuit en phase de fonctionnement, afin de confirmer l'efficience des mesures de réduction du bruit proposées et le respect de la conformité réglementaire (en termes de niveau de bruit atteint), cf. Chapitre 19 du volume IV relatif aux modalités de suivi des mesures environnementales.

Les incidences résiduelles acoustiques sur la santé humaine du projet global Cigéo en phase de fonctionnement sont faibles.

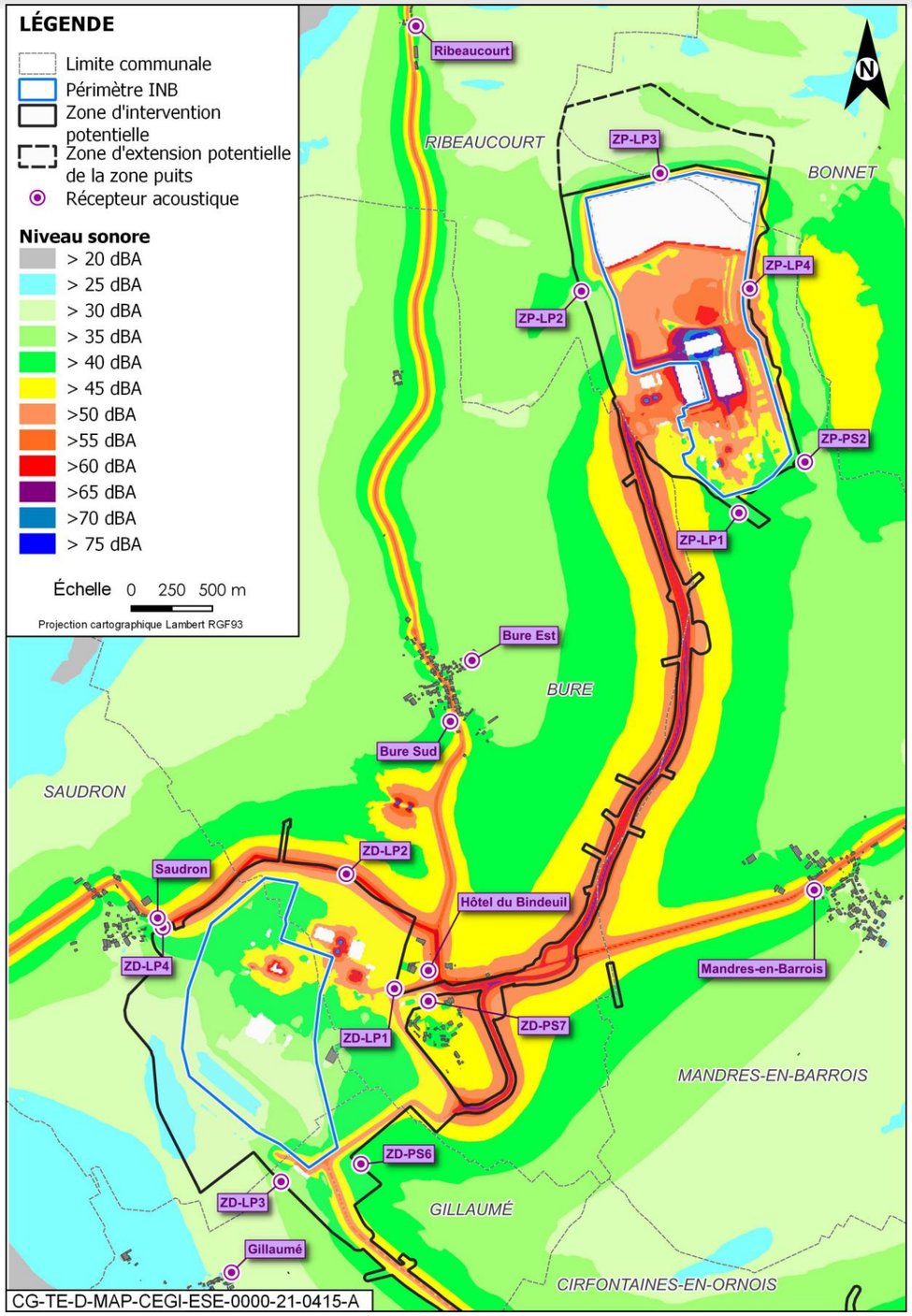


Figure 2-6 *Propagation acoustique - Fonctionnement - Toutes sources du projet global Cigéo (diurne)*

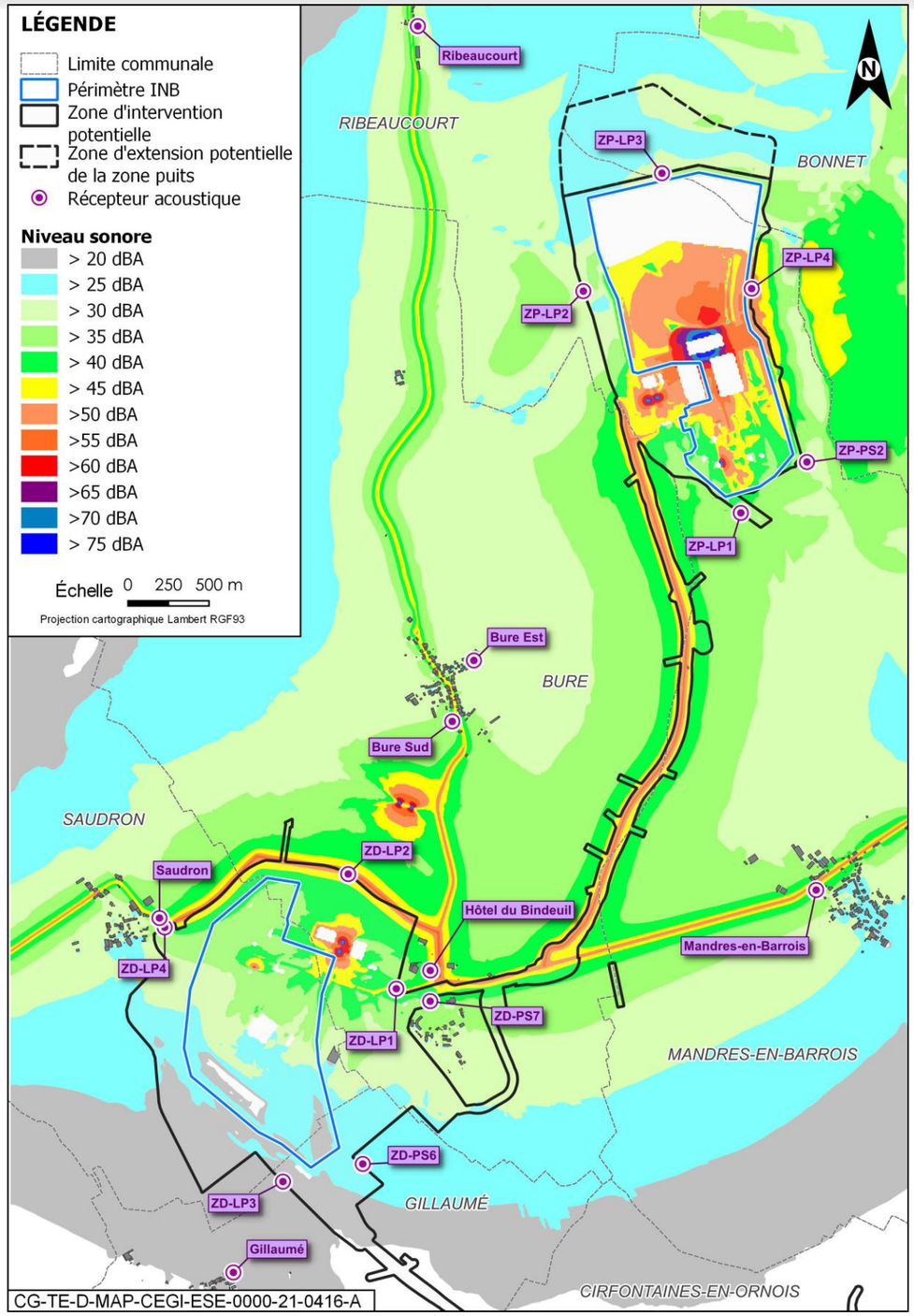


Figure 2-7 *Propagation acoustique - Fonctionnement - Toutes sources du projet global Cigéo (nocturne)*

2.2 Évaluation des incidences liées aux émissions vibratoires sur la santé humaine

Aucune source majeure de vibration n'est recensée dans l'aire d'étude immédiate. Des vibrations légères peuvent être associées aux passages de poids lourds et des engins agricoles.

2.2.1 Incidences potentielles

2.2.1.1 Généralités

Les vibrations peuvent avoir des effets sur les personnes exposées (gêne, inconfort, troubles du sommeil, stress…).

L'évaluation de l'impact sur la santé humaine est réalisée par comparaison avec le seuil de perception des vibrations fixé à 0,10 mm.s^{-1} selon la norme NF ISO 2631-2 de 2014 (8).

2.2.1.2 Incidences potentielles du projet global Cigéo

Les émissions vibratoires du projet global Cigéo et leurs incidences sur l'environnement sont détaillées dans le chapitre 13.2 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les principales sources de vibrations liées au projet global Cigéo sont liées au trafic (routier, ferroviaire) et surtout aux travaux (engins de chantier pour les opérations de terrassement et de construction, tirs à l'explosif pour les terrassements et le creusement des puits). Les travaux en surface sont réalisés en phase d'aménagements préalables et de construction initiale alors que le trafic concerne toute la durée des aménagements préalables, de la construction initiale et du fonctionnement du centre de stockage Cigéo. Les activités au fond de l'installation souterraine ne sont pas susceptibles de produire des vibrations en surface.

Toutefois, quel que soit le type de sol dans lequel se propagent les vibrations, une forte diminution de celles-ci s'opère au-delà de quelques dizaines de mètres.

Les vibrations liées à l'utilisation d'engins de chantier et aux tirs de mines sont perceptibles pour les riverains les plus proches de la zone descenderie (hôtel du Bindeuil, archives EDF, Ferme du Cité, bâtiments de Andra) ; la zone puits étant plus éloignée des zones d'habitation.

Par ailleurs, concernant la ligne 027000 les études vibratoires n'ont pas encore été réalisées et seront présentées dans une étude d'impact actualisée. Des habitations sont présentes à moins de 100 mètres de la voie et sont donc susceptibles de percevoir des vibrations.

Les incidences potentielles des émissions de vibrations sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées.

2.2.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux vibrations, ainsi que leurs effets attendus et modalités de suivi sont présentés dans le chapitre 13 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les mesures d'évitement mises en place en lien avec les vibrations sont les mêmes que celles visant à préserver l'environnement sonore. Elles sont détaillées au chapitre 13.2.1 du volume IV de la présente étude d'impact :

- E1.1b : choix d'implantation du projet global Cigéo à distance des zones urbanisées ;
- E4.2b : circulation des trains uniquement de jour (6 h – 22 h) sauf de très rares exceptions).

La mise en place de ces mesures a pour effet d'éviter les émissions de vibration nocturne. Cela permet d'éviter de nouvelles émissions de vibration et ainsi l'exposition des populations et la gêne occasionnée.

Les principales mesures de réduction mises en place en lien avec les vibrations sont détaillées au chapitre 13.2.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont les suivantes :

- R3.1b : interruption des travaux susceptibles de causer une gêne pour le voisinage entre 20 h et 7 h, et toute la journée les dimanches et jours fériés, sauf en cas d'intervention urgente nécessaire ;
- R2.1a : utilisation privilégiée des infrastructures ferroviaires pour l'approvisionnement des matériaux de construction et évacuation de déchets ;
- R2.1a : circulation des poids lourds et engins de chantier à faible vitesse ;
- R2.1g : chaussées entretenues afin de maintenir leur bon état dans les périmètres des opérations ;
- R2.1g : engins et véhicules régulièrement entretenus ;
- R2.1g : dispositifs limitants les vibrations des engins non mobiles de chantier ;
- R2.1j : optimisation des plans de tirs ;
- R2.1a : limitation de la vitesse maximale des trains ;
- R2.1j : adaptation de l'armement des voies ferrées ;
- R2.2b : semelles résilientes.

La mise en place de ces mesures a pour objectif de réduire les émissions vibratoires à toutes les phases de vie du projet global Cigéo et de limiter ainsi l'exposition des populations.

2.2.3 Incidences résiduelles

L'évaluation des incidences liées aux émissions vibratoires est présentée au chapitre 13.2 du volume IV de la présente étude d'impact. Les vibrations générées par le projet global Cigéo sont faibles. Elles sont très fortement atténuées sur les premières dizaines de mètres.

Concernant le centre de stockage Cigéo, les vibrations émises par différentes sources, à toutes les phases du projet, sont très faiblement perçues après mise en place des mesures au niveau des bâtiments les plus proches de la zone descenderie (habitations de Saudron, hôtel du Bindeuil, archives EDF, Ferme du Cité, bâtiments de Andra). Les activités sources de vibration étant réalisées en journée, elles ne sont pas susceptibles de perturber le sommeil de nuit des résidents.

Les autres opérations du projet global Cigéo génèrent également des vibrations par la circulation et l'utilisation d'engins et de véhicules de chantier en phase d'aménagements préalables. Ces vibrations sont très peu perceptibles en dehors des zones d'intervention potentielles du projet global Cigéo. La perception par les riverains dépendra de la distance entre les chantiers et les habitations. Ces éléments seront précisés dans les actualisations de la présente étude d'impact, une fois la conception de ces projets définie en concertation avec le public.

Après la phase APR, seules la route départementale D60/960 (circulation de poids lourds dont les vibrations s'atténuent très vite) et la ligne ferroviaire 027000 (circulation de trains) sont susceptibles d'émettre des vibrations.

Les incidences résiduelles des vibrations du projet global Cigéo sur la santé humaine sont faibles.

2.3 Évaluation des incidences liées aux émissions lumineuses sur la santé humaine

Le projet global Cigéo se situe dans une zone globalement peu touchée par la pollution lumineuse (cf. Chapitre 13.5 du volume III de la présente étude d'impact).

Les deux principales sources de nuisances lumineuses de l'aire d'étude sont la commune de Ligny-en-Barrois, plus grande ville de l'aire d'étude, et le centre de Meuse/Haute-Marne de l'Andra.

Les autres sources de nuisances lumineuses sont les villages de l'aire d'étude et l'éclairage des habitations.

Par ailleurs, les flashs de sécurité rouge en haut des pylônes des éoliennes à proximité de l'aire d'étude immédiate sont également visibles.

2.3.1 Incidences potentielles

2.3.1.1 Généralités

Pour l'être humain, la lumière est surtout positive. L'éclairage urbain confère un sentiment de sécurité. La lumière est aussi utilisée dans le domaine médical, notamment pour soigner les dépressions hivernales.

Toutefois, les émissions lumineuses peuvent également avoir des effets négatifs sur les personnes exposées. En effet, la lumière artificielle peut occasionner gêne, inconfort, stress... Elle peut inhiber la sécrétion de mélatonine (hormone nécessaire à l'endormissement, causant ainsi des troubles du sommeil). L'exposition prolongée à la lumière artificielle peut également être un agent polluant délétère pour la rétine, en rapport avec la toxicité de la bande bleue (380 nm - 500 nm).

Aucun seuil réglementaire ne s'applique aux émissions lumineuses.

2.3.1.2 Incidences potentielles du projet global Cigéo

Les émissions lumineuses du projet global Cigéo et leurs incidences sur l'environnement sont détaillées dans le chapitre 13.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les principales sources d'émissions lumineuses du projet global Cigéo sont les suivantes :

- l'éclairage de chantier (phares des engins et véhicules, éclairage des aires de travail et installations de chantier) ;
- l'éclairage des parkings ;
- l'éclairage des bâtiments industriels ;
- les éclairages pour des raisons de sécurité et de protection (postes de garde) ;
- les phares des véhicules sur les voies routières.

Ces sources d'émissions lumineuses sont essentiellement liées au centre de stockage Cigéo pendant toutes les phases du projet et dans une moindre mesure à la phase d'aménagements préalables pour les autres opérations du projet global Cigéo.

Les incidences potentielles des émissions lumineuses sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées.

2.3.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions lumineuses, ainsi que leurs effets attendus et modalité de suivi sont présentés dans le chapitre 13 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les mesures d'évitement mises en place en lien avec les émissions lumineuses sont les mêmes que celles visant à préserver l'environnement sonore. Elles sont détaillées au chapitre 13.2.1 du volume IV de la présente étude d'impact :

- E1.1b : choix d'implantation du projet global Cigéo à distance des zones urbanisées ;
- E4.2b : circulation des trains uniquement de jour (6 h – 22 h) sauf de très rares exceptions.

À ces mesures d'évitement s'ajoute une mesure spécifique à la réduction des nuisances lumineuses :

- E3.1c : absence d'éclairage le long de la LIS, de l'ITE, de la ligne 027000, de l'adduction d'eau et de la déviation de la route départementale D60/960.

La mise en place de ces mesures a pour effet d'éviter les émissions lumineuses, et ainsi l'exposition des populations et la gêne occasionnée.

Les principales mesures de réduction mises en place en lien avec les émissions lumineuses sont détaillées au chapitre 13.3.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont les suivantes :

- R3.1b : interruption des travaux susceptibles de causer une gêne pour le voisinage entre 22 h et 7 h ;
- R3.1b : optimisation du nombre d'éclairage ;
- R3.1b : optimisation de la durée de l'éclairage ;
- R2.1k : adaptation de la nature de l'éclairage (adaptation de l'intensité, orientation du flux lumineux).

La mise en place de ces mesures a pour objectif de réduire les émissions lumineuses à toutes les phases de vie du projet global Cigéo et de limiter ainsi l'exposition des populations.

2.3.3 Incidences résiduelles

L'évaluation des incidences liées aux émissions lumineuses est présentée aux chapitres 13.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les émissions lumineuses du centre de stockage Cigéo sont perceptibles depuis l'hôtel du Bindeuil, les habitations des villages de Saudron et Gillaumé et le sud de la zone puits (Mandres-en-Barrois). Les autres opérations du projet global Cigéo ne sont pas sources d'émissions lumineuses permanentes.

La gêne engendrée par cette pollution lumineuse est faible au niveau des habitations, compte tenu des mesures d'évitement et de réduction mises en œuvre, et de l'éloignement des zones puits et descenderie du centre de stockage Cigéo.

Les incidences résiduelles des émissions lumineuses du projet global Cigéo sur la santé humaine sont faibles.

2.4 Évaluation des incidences liées aux émissions olfactives sur la santé humaine

Le territoire de l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo est principalement composé de parcelles agricoles. Dans l'aire d'étude immédiate, les nuisances olfactives sont donc actuellement limitées et l'ambiance olfactive est essentiellement de type rurale (odeurs liées à la végétation, aux épandages ponctuels…).

2.4.1 Incidences potentielles

2.4.1.1 Généralités

La notion d'odeur est très subjective. En effet, dans l'environnement, une odeur est rarement associée à une seule molécule et ce sont le plus souvent des mélanges de composés odorants qui sont perçus. Les odeurs sont le plus souvent perçues à des concentrations très faibles et leur perception est par ailleurs influencée par les vents dominants. Les odeurs peuvent occasionner gêne et inconfort.

Les installations classées pour la protection de l'environnement et les installations nucléaires de base sont soumises à une réglementation sur les émissions d'odeurs préconisant la mise en place de dispositions de limitation des odeurs, et dans la mesure du possible leur captage à la source (9). Cette réglementation est détaillée au chapitre 13.4.1 du volume VII de la présente étude d'impact.

2.4.1.2 Incidences potentielles du projet global Cigéo

Les émissions olfactives du projet global Cigéo et leurs incidences sur l'environnement sont détaillées dans le chapitre 13.4 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les principales sources d'émissions d'odeurs du projet global Cigéo sont liés au trafic sur les routes et voies ferrées créées ou aménagées (gaz d'échappement), ainsi qu'à la mise en place des enrobés routiers sur les voiries pendant les travaux. Plus localement, sur le site du centre de stockage, des émissions d'odeurs peuvent être liées à la présence de déchets putrescibles (restaurants) et de stockages temporaires des eaux dans les bassins de gestion, de produits chimiques ou encore de carburants.

Les incidences potentielles des émissions d'odeurs sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées.

2.4.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions olfactives, ainsi que leurs effets attendus et modalités de suivi sont présentés dans le chapitre 13 du volume IV de la présente étude d'impact.

Le centre de stockage Cigéo (et notamment les ouvrages de surface de gestion des eaux) a été implanté de façon à être éloigné au maximum des zones d'habitations (à l'exception de Saudron dont les premières habitations sont à moins de 100 mètres de la zone d'intervention potentielle de la zone descenderie et à plus de 500 mètres des premières installations industrielles (mesure d'évitement E1.1b : choix d'implantation du projet global Cigéo à distance des zones urbanisées, présentée au chapitre 2.1.2 du présent volume et détaillée au chapitre 13.1.2 du volume IV de la présente étude d'impact).

Pour la phase d'aménagements préalables, il n'y a pas de mesure spécifiquement mise en place pour les odeurs. Indirectement, certaines mesures de réduction mises en place pour d'autres facteurs ont un effet bénéfique sur les nuisances olfactives (l'effet étant indirect, la thématique de l'environnement olfactif n'est pas visée dans ces blocs mères) :

- les engins de chantier sont régulièrement entretenus (R2.1g : Engins et véhicules régulièrement entretenus, mesure présentée au chapitre 13.1 du volume IV de la présente étude d'impact), ce qui permet de limiter l'émission d'odeurs de gaz d'échappement des moteurs thermiques ;
- les mesures de réduction des émissions atmosphériques participent à la réduction des odeurs (mesures présentées au chapitre 2.4 du volume IV de la présente étude d'impact) ;
- les bassins temporaires de gestion des eaux pluviales et les dispositifs de gestion des eaux usées sont dimensionnés et entretenus de façon à limiter les odeurs issues d'eaux stagnantes et d'eaux usées (inclus dans les mesures R2.1d : mises en place de dispositifs de traitement des rejets des eaux pluviales pour ne pas altérer la qualité des eaux superficielles et des eaux souterraines par transfert et R2.2z : Mise en place d'une gestion des eaux industrielles et des eaux usées selon les principes de l'assainissement collectif (et non collectif pour les eaux usées durant la phase d'aménagements préalables), mesures présentées au chapitre 5.4 du volume IV de la présente étude d'impact) ;
- les déchets putrescibles sont régulièrement évacués afin de limiter les odeurs (inclus dans les mesures liées à la gestion des déchets et présentées au chapitre 10.4 du volume IV de la présente étude d'impact).

Pour les phases de construction initiale et de fonctionnement, en complément, les installations susceptibles d'émettre des odeurs sont en cas de besoin aménagées dans des locaux confinés et des systèmes de ventilation et/ou des filtres sont mis en place afin de réduire les odeurs (inclus dans la mesure R2.2z : émissaires de rejets canalisés en hauteur présentée au chapitre 2.4 du volume IV de la présente étude d'impact). Sinon, il n'y a pas de mesure spécifiquement mise en place pour les odeurs. Indirectement, certaines mesures de réduction mises en place pour d'autres facteurs ont un effet bénéfique sur les nuisances olfactives (l'effet étant indirect la thématique de l'environnement olfactif n'est pas visée dans ces blocs mères) :

- les bassins de gestion des eaux pluviales sont dimensionnés et entretenus de façon à limiter les odeurs issues d'eaux stagnantes (inclus dans la mesure R2.1d : mise en place de dispositifs de traitement des rejets des eaux pluviales pour ne pas altérer la qualité des eaux superficielles et des eaux souterraines par transfert présentée au chapitre 5.4 du volume IV de la présente étude d'impact) ;
- la conception et le dimensionnement des installations de gestion des eaux usées prennent en compte les caractéristiques qualitatives et quantitatives des effluents liquides à traiter. Ainsi les choix sont optimisés pour limiter au maximum les stagnations et les risques de fermentation en cas de fortes variations de charge susceptibles d'émettre des odeurs (inclus dans la mesure R2.2z : Mise en place d'une gestion des eaux industrielles et des eaux usées selon les principes de l'assainissement collectif (et non collectif pour les eaux usées durant la phase d'aménagements préalables) présentée au chapitre 5.4 du volume IV de la présente étude d'impact) ;
- les réseaux et regards sont régulièrement entretenus (inclus dans la mesure R2.2z : Mise en place d'une gestion des eaux industrielles et des eaux usées selon les principes de l'assainissement collectif (et non collectif pour les eaux usées durant la phase d'aménagements préalables) présentée au chapitre 5.4 du volume IV de la présente étude d'impact) ;
- les déchets de restauration putrescibles sont régulièrement évacués afin de limiter les odeurs (inclus dans les mesures liées à la gestion des déchets présentées au chapitre 10.4 du volume IV de la présente étude d'impact) ;
- les produits chimiques sont stockés dans des espaces confinés et si besoin ventilés (inclus dans la mesure R2.1d : Mise en place de dispositifs de stockage adaptés pour les produits dangereux présentée au chapitre 3.5 du volume IV de la présente étude d'impact).

La mise en place de ces mesures a pour objectif de réduire les émissions olfactives à toutes les phases de vie du projet global Cigéo et de limiter ainsi l'exposition des populations.

2.4.3 Incidences résiduelles

L'évaluation des incidences liées aux émissions olfactives est présentée au chapitre 13.4 du volume IV de la présente étude d'impact.

Compte tenu de la mise en œuvre des mesures d'évitement et de réduction, les émissions olfactives sont très localisées, ponctuelles, et rapidement dispersées. Elles sont peu perceptibles par les riverains.

Les incidences résiduelles des émissions olfactives du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

2.5 Évaluation des incidences liées aux champs électromagnétiques sur la santé humaine

Les sources d'ondes électromagnétiques dans l'aire d'étude immédiate sont les lignes électriques haute tension, dont la ligne Houdreville - Méry (400 kV), les lignes secondaires et les postes de transformation électrique.

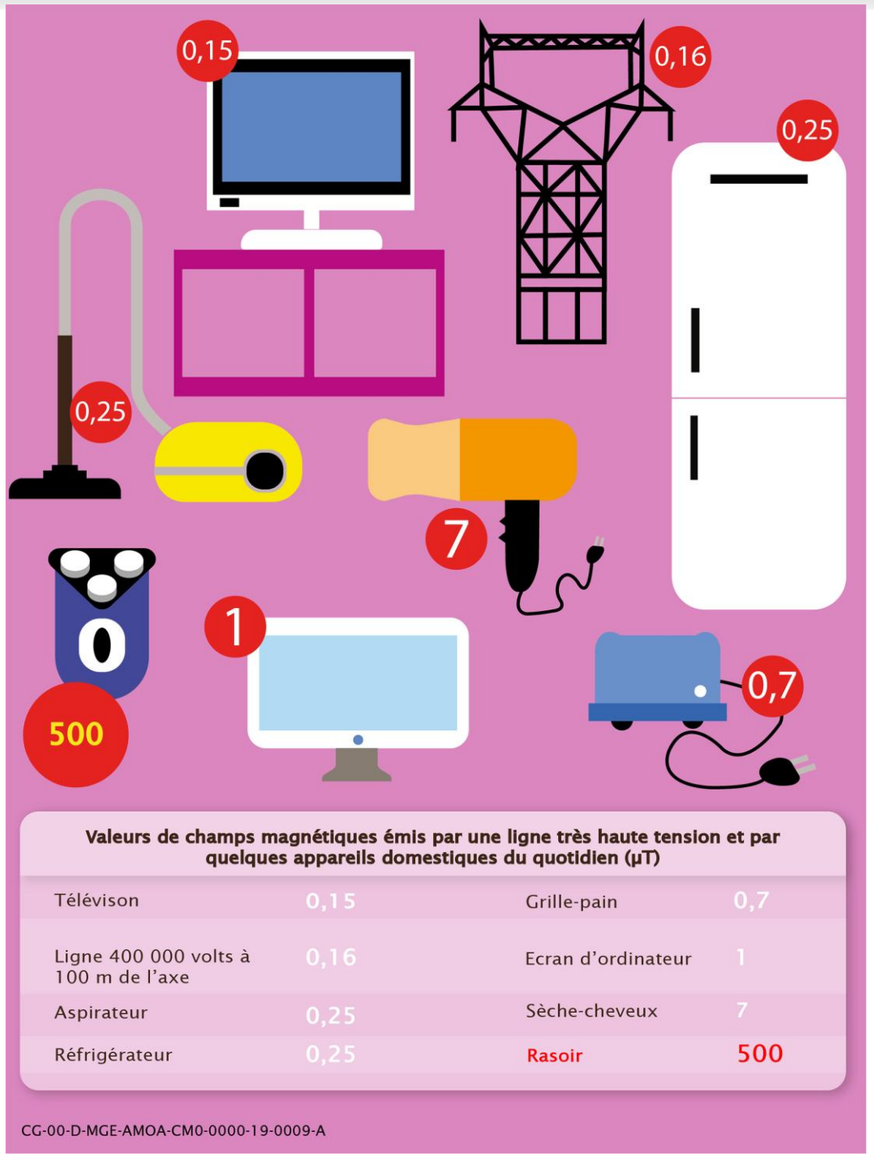
2.5.1 Incidences potentielles

2.5.1.1 Généralités

La notion de champ traduit l'influence que peut avoir une émission ou un objet sur l'espace qui l'entoure (la terre, par exemple, exerce un champ de pesanteur qui se manifeste par les forces de gravitation). La définition des champs électromagnétiques est présentée en détail au chapitre 13.7 du volume III de la présente étude d'impact. Les sources possibles de champs électriques et magnétiques sont de deux types :

- **les sources naturelles** : il s'agit de sources qui génèrent des champs statiques, tels le champ magnétique terrestre et le champ électrique statique atmosphérique, lié à la météorologie ;
- **les sources liées aux usages de l'électricité :** il s'agit des appareils qui consomment de l'électricité (électroménager, matériel de bureau ou équipement industriel) et des équipements et installations qui servent à la produire (alternateurs et générateurs) et l'acheminer (lignes et câbles électriques). Tous engendrent des champs électriques et magnétiques quand ils fonctionnent. Ce sont principalement des champs à 50 Hz.

Les valeurs des champs électriques et magnétiques à 50 Hz produits par quelques appareils ménagers ou installations électriques[3] sont présentées à titre illustratif sur la figure 2-8.



Valeurs de champs magnétiques émis par une ligne très haute tension et par quelques appareils domestiques du quotidien (µT)

Télévison	0,15	Grille-pain	0,7
Ligne 400 000 volts à 100 m de l'axe	0,16	Ecran d'ordinateur	1
Aspirateur	0,25	Sèche-cheveux	7
Réfrigérateur	0,25	Rasoir	500

CG-00-D-MGE-AMOA-CM0-0000-19-0009-A

Figure 2-8 Champs électromagnétiques émis par des appareils et installations de la vie quotidienne

De très nombreuses études ont été menées depuis plus de 35 ans, dans de nombreux pays, afin de déterminer si les champs électriques et magnétiques à 50 Hz peuvent avoir, sur le long terme, des effets sur la santé. Ces études reposent sur deux méthodes : l'une expérimentale et l'autre épidémiologique.

[3] Source : http://www.clefdeschamps.info/

2.5.1.2 Les études expérimentales

Les études expérimentales, menées en laboratoire, sont des études qui cherchent à provoquer des effets de manière contrôlée. Pour qu'un effet soit reconnu comme établi, l'expérience qui l'a observé doit être répliquée avec des résultats identiques dans des laboratoires différents.

En 1992, le Congrès des États-Unis d'Amérique a engagé un vaste programme de recherches expérimentales et d'information sur les champs électriques et magnétiques : le « *EMF-RAPID Program* ». Le rapport final, rendu public en mai 1999 sous l'égide du *National Research Council* (10), conclut que *« toutes les tentatives de réplication expérimentale ont abouti à des résultats négatifs ou pour le moins incertains et que pratiquement toutes les études animales sur le cancer se sont avérées négatives, même à des niveaux d'exposition supérieurs de 100 à 1 000 fois aux niveaux usuels d'exposition résidentielle ».*

Depuis ce premier grand programme de recherche, le constat est resté inchangé : les études expérimentales sur des cellules et sur des animaux de laboratoire n'ont jamais permis d'identifier un mécanisme d'action crédible des champs électriques et magnétiques pouvant conduire à des pathologies.

2.5.1.2.1 Les études épidémiologiques

Les études épidémiologiques consistent à étudier des populations qui, par leur travail ou leur lieu de résidence ou encore leurs habitudes de vie, sont exposées à un facteur d'environnement, en l'occurrence les champs électromagnétiques. On compare la santé de ces populations (et notamment le taux de cancer) à celle d'une population de référence qui est moins exposée. Les études épidémiologiques sont donc des études d'observation qui, contrairement à l'expérimentation, n'interviennent pas sur le cours des évènements.

D'une manière générale, les études épidémiologiques menées sur les effets des champs électromagnétiques ont produit des résultats statistiques faibles, parfois contradictoires, et ont posé - et posent toujours - des problèmes de cohérence et de biais potentiels. Leurs auteurs s'accordent eux-mêmes à reconnaître l'existence de possibles biais qui pourraient expliquer certains résultats. Il s'ensuit qu'une étude isolée est totalement insuffisante pour permettre de tirer des conclusions générales sur l'existence ou non d'effets sanitaires.

L'illustration qu'on peut donner de cette difficulté d'analyse est celle des deux études épidémiologiques menées par Draper et Bunch au Royaume-Uni. L'étude Draper *et al.,* publiée en 2005 (11) et couvrant les cas de leucémie infantile identifiés entre 1962 et 1995 avait observé un excès significatif de leucémies jusqu'à 200 mètres des lignes à haute tension. Publiée neuf ans plus tard, basée sur les mêmes données, mais étendues jusqu'à l'année 2008, l'étude de Bunch *et al.,* (12) n'observe plus de risque, quelle que soit la distance aux lignes. Une étude danoise publiée en 2015 (13) a confirmé cette tendance.

2.5.1.2.2 Les expertises collectives internationales

Face aux résultats contradictoires des études, des expertises collectives sur les effets des champs électriques et magnétiques ont été réalisées par des scientifiques à travers le monde, sous l'égide de gouvernements ou d'instances gouvernementales. Ces expertises regroupent et comparent les résultats de centaines d'études.

Les expertises internationales de référence sont notamment celles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), de la Commission internationale de protection des rayonnements non ionisants (ICNIRP), du PHE18 anglais (*Public Health England)*, et du Comité européen scientifique sur l'environnement et les risques sanitaires nouvellement identifiés (SCENIHR).

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), instance de l'Organisation mondiale de la santé, a réalisé une expertise sur l'effet cancérigène éventuel des champs électromagnétiques statiques et basse fréquence en juin 2001. Les conclusions du CIRC (14) constituent à ce jour la référence à partir de laquelle se prononcent toutes les expertises collectives actuelles, à savoir :

- les études expérimentales sur animaux de laboratoire sont négatives : aucun effet n'a été établi sur l'apparition et le développement des cancers ainsi que sur la reproduction (malformation, avortement) ;
- aucun risque pour les adultes n'a été établi par les études épidémiologiques en général, y compris pour les fortes expositions rencontrées en milieu professionnel ;
- certaines études épidémiologiques ont trouvé une association statistique entre l'exposition moyenne aux champs magnétiques et une augmentation du risque de leucémie pour l'enfant. La démonstration de la réalité de cette association reste cependant peu convaincante, d'une part parce que les études épidémiologiques n'ont pas toutes observé cette association, d'autre part parce qu'elles ne sont pas exemptes de biais et enfin parce qu'aucun résultat expérimental (c'est-à-dire aucun mécanisme d'action identifié) ne vient corroborer cette association statistique.

C'est sur cette base que le CIRC a classé les champs magnétiques 50 Hz/60 Hz comme « cancérigènes possibles » vis-à-vis du risque de leucémie de l'enfant (catégorie 2B), et comme non classifiables en termes de cancérogénicité vis-à-vis de tous les autres types de cancers pour les adultes et les enfants (catégorie 3).

Pour rappel, pour prévenir les éventuels effets liés à une exposition à des champs électromagnétiques trop intenses, des valeurs limites d'exposition ont été définies par la réglementation française. Ces valeurs limites d'exposition du public sont basées sur une recommandation de l'Union européenne et sur les lignes directrices de la Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes (ICNIRP) publiées en 1999 (15). Elles ont pour objectif d'apporter aux populations *« un niveau élevé de protection de la santé contre les expositions aux champs électromagnétiques ».*

Les valeurs limites instantanées, à ne pas dépasser aux endroits où *« le public passe un temps significatif »*, sont les suivantes :

- 5 000 volt/m pour le champ électrique ;
- 100 micro-Tesla pour le champ magnétique.

En France, tous les nouveaux ouvrages électriques doivent respecter un ensemble de conditions techniques définies par l'arrêté interministériel du 17 mai 2001 (16), qui reprend, dans son article 12 bis, ces mêmes valeurs limites afin de préserver la santé des populations.

2.5.1.3 Incidences potentielles du projet global Cigéo

Les émissions de champs électriques et magnétiques du projet global Cigéo et leurs incidences sur l'environnement sont détaillées dans le chapitre 13.5 du volume IV de la présente étude d'impact.

L'installation terminale embranchée et la ligne ferroviaire 027000 ne sont pas électrifiées.

La construction et le fonctionnement de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo conduisent à la présence de courants électriques qui peuvent avoir des incidences magnétiques en surface. Compte tenu de la profondeur de 500 mètres de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo, des sources de courant utilisée, le champ magnétique généré en surface est de fait très faible, et ce en regard notamment du champ magnétique naturel ou celui généré par des sources de courant en surface.

Les émissions électromagnétiques proviennent des opérations d'alimentation électrique du projet global Cigéo (cf. Chapitre 4.4.1 du volume II de la présente étude d'impact). Ces opérations, représentées sur la figure 2-9, sont :

- les travaux de sécurisation de la ligne 400 kV sur 130 km de la commune de Balignicourt (Aube) jusqu'au poste d'Houdreville (Meurthe-et-Moselle), sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- deux très courtes portions de lignes électriques aériennes de 400 kV reliant la ligne très haute tension existante et le futur poste de transformation 400/90 kV, sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- le poste de transformation 400/90 kV, sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- les liaisons souterraines 90 kV entre le poste de transformation et les zones descenderie et puits, sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- les postes de livraison 90 kV sur les zones descenderie et zone puits, sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- deux postes de transformation 90/20 kV, sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra, respectivement accolés aux postes de livraison RTE.

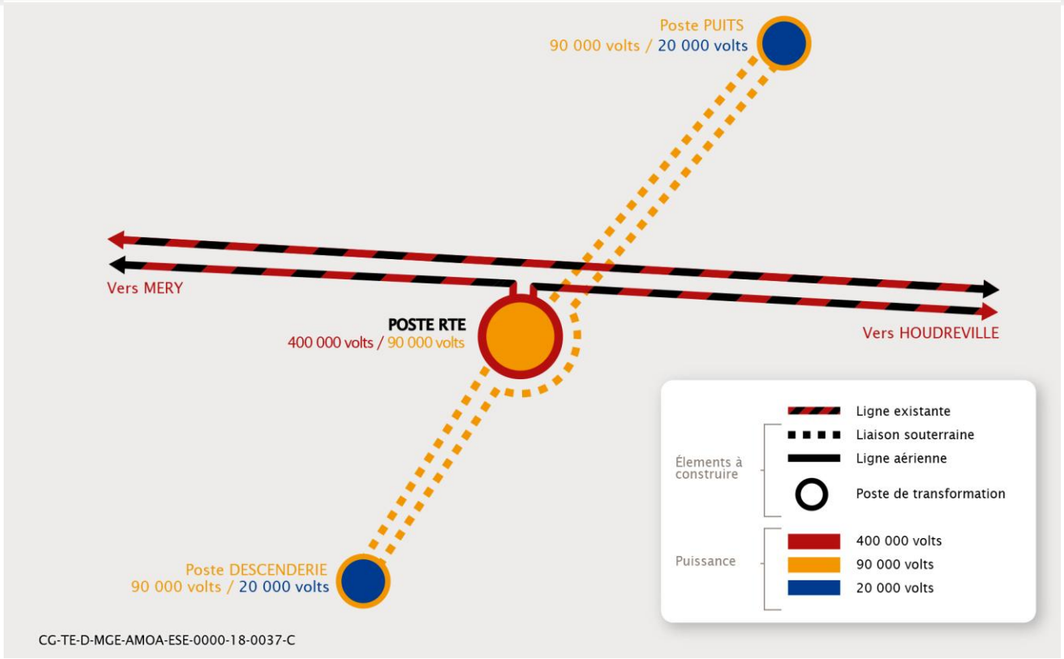


Figure 2-9 Illustration des opérations de raccordement sur la ligne électrique 400 kV[4]

Le fonctionnement des ouvrages d'alimentation électrique du réseau de transport d'électricité (RTE) est susceptible de générer des champs électromagnétiques. Les installations d'alimentation électrique sont des installations de basse fréquence (50 Hz) qui génèrent donc des champs électriques et électromagnétiques.

Les travaux de sécurisation de la ligne haute tension 400 kV d'Houdreville-Méry ne modifient pas la puissance de son champ électromagnétique. Ils n'entrainent donc pas d'émissions électromagnétiques supplémentaires par rapport à la ligne actuelle.

Les incidences potentielles des émissions électromagnétiques sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées.

2.5.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions de champs électromagnétiques, ainsi que leurs effets attendus et modalités de suivi sont présentés dans le chapitre 13 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les principales mesures d'évitement mises en place sont les suivantes :

- E2.2b : implantation du poste de transformation 400/90 kV éloignée des zones d'habitation ;
- E2.2b : éloignement des postes de livraison et de transformation 90/20 kV des zones puits et descenderie des zones habitées.

La mise en place de ces mesures a pour effet d'éviter les émissions électromagnétiques à proximité des secteurs habités, évitant ainsi l'exposition des populations et la gêne occasionnée.

[4] Source RTE

Les principales mesures de réduction mises en place en lien avec les émissions de champs électromagnétiques sont détaillées au chapitre 13.5.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont les suivantes :

- R1.2a : implantation du poste de transformation à proximité immédiate de la ligne 400 kV Houdreville-Méry ;
- R2.2z : présence d'un écran métallique coaxial extérieur relié à la terre ;
- R2.2z : études spécifiques et dispositions techniques mises en œuvre en cas de mise en évidence de tensions parasites.

La mise en place de ces mesures a pour objectif de limiter l'exposition des populations à ces champs électromagnétiques.

2.5.3 Incidences résiduelles

Les installations d'alimentation électrique du projet global Cigéo (courtes portions de lignes électriques aériennes 400 kV, liaisons souterraines 90 kV, postes de transformation et postes de livraison) génèrent des champs électromagnétiques de basse fréquence à 50 Hz.

2.5.3.1 Les champs électromagnétiques émis par la ligne électrique aérienne 400 kV

La ligne électrique aérienne 400 kV existe déjà, seules deux courtes portions de ligne 400 kV supplémentaires sont nécessaires pour le raccordement au poste de transformation 400/90 kV. Ces deux portions de liaisons électriques aériennes de 400 kV créées sont issues de la coupure du circuit de la ligne 400 kV Houdreville-Mery et permettront le raccordement du poste de transformation 400/90 kV. Les champs électriques et magnétiques générés par ces deux nouvelles portions de liaisons de 400 kV sont semblables à ceux générés par le tronçon actuel de la liaison Houdreville-Mery.

Les champs magnétiques (CM_{50}) et champs électriques (CE_{50}) maximaux, estimés pour l'intensité maximale en régime normal d'exploitation, et moyens, calculés à partir du courant annuel moyen, générés à proximité de la ligne aérienne 400 kV sont présentés dans le tableau 2-7.

Tableau 2-7 Champs électriques et magnétiques pour une tension de 400 kV

	Champ électrique (en V/m)			Champ magnétique (en µT)		
	Sous les conducteurs	À 30 m de l'axe	À 100 m de l'axe	Sous les conducteurs	À 30 m de l'axe	À 100 m de l'axe
Valeurs maximales	4 950	1 950	50	35	11,5	0,6
Valeurs moyennes	-.	-	-	17,5	5,75	0,3
Valeurs réglementaires (15)	5 000			100		

Les valeurs maximales et moyennes des champs magnétiques et électriques respectent les valeurs réglementaires (valeurs de référence de la recommandation européenne reprises dans la réglementation française (16), cf. Chapitre 13.5 du volume VII de la présente étude d'impact).

De plus, les portions supplémentaires de ligne électrique aérienne 400 kV sont éloignées des habitations de plusieurs centaines de mètres (cf. Chapitres 2.8.1 et 4.4.1 du volume II de la présente étude d'impact).

2.5.3.2 Les champs électromagnétiques émis par les liaisons souterraines 90 kV

Les champs électriques générés par les liaisons souterraines 90 kV sont négligeables compte tenu de la présence de l'écran métallique coaxial extérieur relié à la terre.

Les champs magnétiques (CM_{50}) maximaux, estimés pour l'intensité maximale en régime normal d'exploitation, et moyens, calculés à partir du courant annuel moyen, générés à proximité des liaisons souterraines 90 kV sont présentés dans le tableau 2-8. Conformément aux normes de mesures NF EN 61786-1 de 2014 (17), CEI 62110 de 2009 (18) et UTE C 99-132 de 2010 (19), les valeurs de champs magnétiques sont calculées à un mètre du sol.

Tableau 2-8 *Valeurs moyennes et maximales des champs magnétiques pour une tension de 90 kV, comparées à la limite réglementaire*

	Champs magnétiques (en µT)					
	Type de pose	**Au-dessus de la liaison**	**À 5 m de l'axe de la liaison**	**À 10 m de l'axe de la liaison**	**À 15 m de l'axe de la liaison**	**À 100 m de l'axe de la liaison**
Valeurs maximales	Fourreaux trèfles non jointifs	25	4	1	0,5	<0,1
Valeurs moyennes		8,6	1,4	0,4	0,2	<0,1
Valeur réglementaire (15)	100					

Les valeurs maximales sont calculées pour l'intensité maximale en régime de service permanent et pour des géométries de pose particulières, correspondant à celles des chambres de jonction. Au-dessus de quelques points particuliers (par exemple, en cas de contraintes techniques ponctuelles), le champ magnétique pourrait très localement dépasser les valeurs indiquées, tout en restant largement inférieures à la limite réglementaire.

De plus, tout comme les postes de transformation et de livraison et les portions de ligne aérienne 400 kV, les liaisons souterraines 90 kV, sont éloignées des habitations.

2.5.3.3 Les champs électromagnétiques émis par les postes de transformation et de livraison

Les champs électriques et magnétiques générés par les équipements électriques (postes de transformation et de livraison) sont négligeables par rapport à ceux générés par les liaisons aériennes et souterraines qui leurs sont raccordées. Par ailleurs, les implantations du poste de transformation 400/90 kV, les postes de livraison 90 kV et les postes de transformation 90/20 kV sont situées à l'écart des lieux d'habitation.

2.5.3.4 Conclusion

Les installations d'alimentation électrique (portions de ligne aérienne 400 kV, liaisons souterraines 90 kV et postes de transformation et de livraison) sont implantées à l'écart des lieux d'habitation.

Les incidences résiduelles liées aux émissions de champs électriques et magnétiques du projet global Cigéo sont inférieures aux limites réglementaires.

Les incidences résiduelles des émissions de champs électriques et magnétiques du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

3

Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine

3.1 Évaluation des incidences liées aux effluents chimiques liquides sur la santé humaine **30**

3.2 Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques sur la santé humaine **39**

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions chimiques liquides et atmosphériques pendant ses phases d'aménagements préalables, de construction initiale puis de fonctionnement.

L'évaluation des incidences sur la santé humaine liée aux émissions chimiques s'intéresse aux substances susceptibles d'avoir des effets sur la santé des populations environnantes du fait de leur potentielle toxicité.

La méthodologie retenue pour l'évaluation de l'impact sanitaire des rejets de ces substances présentant un risque chimique suit les recommandations de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (20). L'évaluation est réalisée selon une démarche prudente, avec des choix d'hypothèses majorantes afin de couvrir au maximum les incertitudes associées. La méthodologie est présentée en détail au chapitre 8 du présent volume.

Une étude complémentaire air et santé de type III[5] conforme à la note du ministère du 22 février 2019 (21) sera intégrée à la version actualisée de l'étude d'impact du projet global Cigéo associée aux autorisations nécessaires à la réalisation des infrastructures routières du projet global Cigéo (liaison intersites et déviation de la route départementale D60/960). Elle détaillera les effets sur la santé liés à ces infrastructures routières. Étant donnée la faible densité de population et les faibles trafics relevés dans l'aire d'étude rapprochée ainsi que la longueur réduite de voies nouvelles nécessaires au projet global Cigéo, cette étude, conformément à la note ministérielle, sera en partie qualitative. Elle s'appuiera sur les mesures de qualité de l'air présentées au chapitre 2.4 du volume IV de la présente étude, complétée d'une campagne sur les dioxydes d'azote. Les émissions liées aux infrastructures routières ont été pris en compte dans l'évaluation des risques chimiques qui sera présentée dans ce présent chapitre.

Conformément à la méthodologie recommandée par l'Ineris (20), la démarche d'évaluation du risque sanitaire se déroule en quatre étapes :

- l'évaluation des émissions de l'installation, des enjeux et des voies d'exposition humaine : caractérisation des émissions et conformité au regard des prescriptions réglementaires et aux meilleures techniques disponibles, sélection des substances d'intérêt puis élaboration d'un schéma conceptuel décrivant les relations entre les sources de polluants, les milieux et les vecteurs de transfert et les usages et populations exposées ;
- l'identification des dangers des substances chimiques et des relations dose-réponse : sélection des composés traceurs, recherche des valeurs toxicologiques de référence, ses valeurs réglementaires, ainsi que les préconisations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et autres structures de santé publique ;
- l'évaluation de l'exposition des populations : estimation des concentrations d'exposition en considérant les différents media d'exposition (selon leur pertinence) : air (exposition par inhalation), sol, végétaux, animaux pour la viande, lait maternel, etc. ;
- la caractérisation du risque : évaluation qualitative ou quantitative du risque à partir de la synthèse des informations issues de l'évaluation des expositions et de l'identification des relations dose-réponse.

À titre d'information, la correspondance entre les étapes de la démarche d'évaluation des risques sanitaires de l'Ineris (20) et leur restitution dans la présente étude d'impact est présentée dans le tableau 3-1 ci-dessous.

Tableau 3-1 *Correspondances entre les étapes de la démarche d'évaluation des risques sanitaires de l'Ineris et leur restitution dans le présent volume VI de l'étude d'impact*

Démarche d'évaluation des risques sanitaires de l'Ineris	Restitution de l'évaluation des risques sanitaire dans l'étude d'impact du projet global Cigéo
Évaluation des émissions de l'installation, voies d'exposition et populations	Chapitres 3.1.1.1 et 3.2.3.1 du présent volume de l'étude d'impact
Identification des dangers et évaluation des relations dose-réponse	Chapitres 3.1.3.2 et 3.2.3.2 du présent volume de l'étude d'impact
Analyse des expositions chimiques	Chapitres 3.1.3.3 et 3.2.3.3 du présent volume de l'étude d'impact
Évaluation quantitative du risque sanitaire	Chapitres 3.1.3.4 et 3.2.3.4 du présent volume de l'étude d'impact
Discussion des incertitudes	Chapitre 8.2.3 du présent volume de l'étude d'impact
Appréciation des incidences résiduelles	Chapitres 3.1.3.5 et 3.2.3.5 du présent volume de l'étude d'impact

[5] Ces études air et santé se répartissent en quatre types de I à IV. Le type I, comprenant des mesures sur sites et des modélisations, s'applique aux infrastructures routières les plus conséquentes. Le type IV qui s'appuie uniquement sur des données bibliographiques, concernent les projets les plus restreints. La note du ministère (21) détaille les critères relatifs à chaque catégorie.

3.1 Évaluation des incidences liées aux effluents chimiques liquides sur la santé humaine

Le détail des usages et de la qualité des eaux superficielles et souterraines est présenté au chapitre 5 du volume III de la présente étude d'impact.

Il n'existe pas sur l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo, ni dans l'aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV de prélèvement déclaré d'eau superficielle pour des usages alimentaires (alimentation en eau potable des collectivités). Les débits et qualité des eaux superficielles ne sont d'ailleurs pas favorables à un tel usage.

Il n'existe pas sur l'aire d'étude éloignée du milieu physique de prélèvement déclaré d'eau superficielle pour des usages agricoles (cultures irriguées, hormis éventuellement prairies et jardins familiaux, abreuvement des troupeaux...). En revanche, les rives des cours d'eau sont majoritairement accessibles au bétail pour abreuvage notamment l'Orge, La Bureau et l'Ormançon. Du côté de la Marne, des prélèvements agricoles sont possibles en période de sécheresse mais en dessous des seuils administratifs de déclaration. Des activités de pêche sont pratiquées dans les cours d'eau pérennes de l'aire d'étude éloignée et dans certains plans d'eau (Gillaumé, Ligny-en-Barrois). Aucune zone de baignade réglementairement autorisée n'est recensée dans l'aire d'étude éloignée milieu physique.

La qualité chimique actuelle des cours d'eau sur l'aire d'étude éloignée du milieu physique est très variable selon les stations de prélèvement et l'année d'étude avec une dégradation récurrente liée à la présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Les masses d'eau des calcaires du Barrois (masse d'eau FRHG303 « Calcaires Tithonien karstique entre Seine et Ornain ») et du Kimméridgien-Oxfordien (masse d'eau FRHG306 « Calcaires Kimméridgien Oxfordien karstique entre Seine et Ornain ») sont utilisées sur l'aire d'étude éloignée du milieu physique pour l'alimentation en eau potable de collectivités (cf. Chapitre 5.3.4 du volume III de la présente étude d'impact). Ces masses d'eau présentent localement un mauvais état des eaux pour 2019 d'après les données des piézomètres de suivi de l'Andra. Des analyses de qualité réalisées localement au sein de l'aire d'étude éloignée du milieu physique ont révélé des pollutions pour la nappe des Calcaires du Barrois (MES, herbicides...), la nappe correspondant à la masse d'eau du Kimméridgien-Oxfordien (MES, sulfates...) et la nappe des Calcaires du Dogger (chlorure). Toutefois ces mesures au niveau local ne semblent pas représenter l'état global de ces masses d'eau, puisque celles-ci ont officiellement été qualifiées de « bon état » chimique selon les données d'état des lieux publiques de 2019 du système d'information sur l'eau du bassin Seine-Normandie.

3.1.1 Incidences potentielles

3.1.1.1 Généralités

Les effluents liquides chimiques peuvent avoir des effets sur la santé de diverses natures : dysfonctionnement du système nerveux, cancers, allergie... Les caractéristiques et les effets potentiels pour la santé humaine des émissions liquides chimiques sont détaillées dans le tableau 3-2 ci-après.

Tableau 3-2 Caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques et agents infectieux potentiellement présents dans les effluents du projet global Cigéo

Composés chimiques	Caractéristiques	Effets potentiels sur la santé
Hydrocarbures	Les hydrocarbures dans les eaux peuvent être issus d'une éventuelle pollution chronique ou accidentelle liée à la présence d'engins ou de matériels à moteurs thermiques, ainsi que de dispositifs de distribution de carburant.	En petite quantité, l'ingestion d'hydrocarbures, tels que des distillats de pétrole (essence, kérosène, white-spirit utilisés pour diluer les peintures…), entraîne des effets globaux minimes. S'ils sont ingérés en grandes quantités, les hydrocarbures peuvent circuler par la voie sanguine et entraîner un dysfonctionnement du système nerveux central ou hépatique. Les expositions aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, exemple : benzo(a)pyrène) peuvent provoquer des pathologies cardiovasculaires (cardiopathie ischémique) et respiratoires (BPCO, asthme, emphysème). Divers types de cancers touchant en particulier la peau, le poumon, la vessie, l'œsophage et le système hémato-lymphatique sont associés à l'exposition à des mélanges d'HAP dont le benzo(a)pyrène. Le benzo(a)pyrène est génotoxique et est à l'origine de la formation d'adduits à l'ADN. Il entraine une toxicité sur les organes reproducteurs masculins et féminins, sur le développement fœtal, ainsi que des perturbations hormonales.
Sulfates	Les sulfates peuvent être présents dans les eaux usées de sanitaires ou dans les eaux de ruissellement des verses.	Les eaux riches en sulfates[6] ont des effets diurétiques et laxatifs. Elles peuvent être préconisées lors de certains dysfonctionnements rénaux ou bien lors d'épisodes de constipation. Un niveau élevé de sulfates dans l'eau de boisson peut provoquer une déshydratation ou des diarrhées.
Minéraux : nombreux aluminosilicates et carbonates	Les minéraux sont présents dans le sol, les roches ou le béton. Ils peuvent se retrouver dans la matière en suspension dans les eaux de ruissellement et les eaux usées de sanitaires.	Les minéraux ingérés sont essentiels au bon fonctionnement du corps humain, mais lorsqu'ils sont ingérés en grande quantité, ils peuvent être cancérigènes.
Métaux (cuivre, plomb, zinc, cadmium, silicium, arsenic, argent, etc.)	Les métaux peuvent être présents sous forme de traces dans les matériaux de construction des ouvrages ou équipements (principalement cuivre, plomb, zinc et cadmium) et dans les verses comme constituants minéralogiques Ces métaux peuvent se retrouver dans les eaux usées de sanitaires, les eaux industrielles ou les eaux de ruissellement.	Le cuivre est présent dans le corps humain en tant qu'oligoélément (l'organisme d'un adulte en renferme environ 100 mg). Il est indispensable à la formation du collagène, une protéine présente dans les os, la peau et les tissus conjonctifs. L'apport quotidien fourni par l'alimentation et les suppléments en cuivre ne doit pas dépasser 2 mg. En cas d'apport trop élevé, le cuivre peut provoquer un syndrome pseudo-grippal, appelé « fièvre des métaux », et des troubles digestifs, hépatiques voire des atteintes rénales par voie orale. C'est aussi un irritant cutané. Le plomb est l'un des métaux les plus nocifs pour la santé. Ingéré ou inhalé, le plomb se retrouve dans le sang et se fixe sur les tissus mous (foie, rate, reins…), ainsi que sur les systèmes osseux et dentaire où il peut être stocké par accumulation. Il est éliminé lentement par les voies naturelles. L'intoxication aiguë au plomb est rare (nécessite une ingestion massive). Cette intoxication peut provoquer des douleurs abdominales, des vomissements et parfois des diarrhées. L'exposition chronique par ingestion au plomb peut provoquer des douleurs abdominales, des effets sur les systèmes nerveux central et périphérique (troubles de la mémoire, effets sur la thyroïde, neuropathie périphérique…), des effets hématologiques (anémies) et des effets rénaux comme l'insuffisance rénale chronique. Le zinc est présent dans le corps humain en tant qu'oligoélément antioxydant. Dans l'organisme, il se trouve principalement au niveau des muscles et des os. Les aliments les plus riches en zinc sont les fruits de mer, les abats, les viandes et les fromages. L'apport quotidien fourni par l'alimentation ne doit pas dépasser 15 mg par jour. Une ingestion élevée de zinc peut provoquer des céphalées, des troubles du système digestif, des modifications hématologiques ainsi que des lésions du foie, du pancréas et des reins. Le cadmium est toxique pour le corps humain où il n'a pas de rôle physiologique à y jouer. On peut le retrouver en faible quantité et de façon naturelle (issus des feux de forêts et des volcans) dans certains aliments comme le foie, les champignons, les crustacées et les algues séchées. La fumée de tabac transporte aussi dans les poumons du cadmium. Dans un premier temps, le cadmium va s'accumuler provisoirement dans le foie puis dans les reins. Il peut provoquer des lésions irréversibles à ces organes. Ainsi, l'ingestion de cadmium peut se traduire par des atteintes digestives importantes (avec de possibles complications hépatiques et rénales) mais aussi par des effets sur l'appareil respiratoire (toux, œdème pulmonaire). L'exposition chronique par ingestion peut être responsable d'une atteinte rénale osseuse et dentaire ainsi que cardio-vasculaire (hypertension). L'exposition au cadmium par inhalation peut aussi se traduire par un excès de cancers pulmonaire et prostatique. Les principaux effets toxiques de l'exposition répétée à l'arsenic sont dermatologiques (dermite d'irritation, mélanodermie, hyperkératose palmoplantaire, maladie de Bowen, carcinomes), neurologiques (neuropathie périphérique, troubles mentaux organiques), cardiovasculaires (phénomène de Raynaud, artérite des membres inférieurs, hypertension artérielle, maladies ischémiques cardiaques et cérébrales), métaboliques (diabète), cancérogènes (carcinomes cutanés baso- et spinocellulaires, cancers bronchopulmonaires, tumeurs de l'arbre urinaire, cancers hépatiques). Plusieurs études récentes rapportent des excès de risque d'avortement, d'accouchement prématuré et de mort *in utero* associés à l'exposition à l'arsenic pendant la grossesse. Les effets toxiques du chrome sont déclenchés principalement par des expositions par voie cutanée ou par inhalation. Une exposition cutanée provoque une toxicité systémique grave avec notamment nécrose tubulaire rénale. L'inhalation prolongée peut, dans certaines circonstances, mener à l'ulcération et la perforation du septum nasal et au cancer de poumon. Le chrome, particulièrement le Cr (VI), est sensibilisant et la dermatite allergique est l'effet le plus commun après exposition au chrome, l'asthme étant plus rarement rapporté. Inhalé ou ingéré le mercure a une action sur les systèmes nerveux central et périphérique, ainsi que sur l'appareil digestif, le système immunitaire, les poumons et les reins. Les symptômes peuvent comprendre des tremblements, l'insomnie, des pertes de mémoire, des maux de tête, une faiblesse musculaire et, dans les cas extrêmes, la mort. Les fœtus dont la mère présente un taux élevé de mercure dans le sang peuvent naître avec des lésions cérébrales et des problèmes auditifs et visuels. L'exposition au nickel peut se traduire par un excès des cancers des poumons, du larynx et de la prostate. Le nickel est une substance possiblement allergisante pour de nombreuses personnes. L'exposition au sélénium peut provoquer l'irritation des muqueuses digestives, respiratoires et oculaires. En cas d'ingestion, des signes neurologiques ont été rapportés. Les études environnementales ne montrent pas d'effet du sélénium sur la fertilité ou le développement. L'uranium est létal pour l'homme à partir de quelques grammes. L'exposition à l'uranium provoque des troubles rénaux et des perturbations endocriniennes. L'uranium est aussi reprotoxique *via* notamment un effet délétère sur les organes reproducteurs. L'uranium induit des effets sur le développement (toxicité fœtale et embryonnaire).

[6] À titre d'information, la référence de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux conditionnées est fixée à 250 mg/L (22). Certaines eaux minérales contiennent des teneurs en sulfates largement supérieures à 250 mg/L

Composés chimiques	Caractéristiques	Effets potentiels sur la santé
Solvants	Les solvants peuvent être présents dans des matériaux de construction ou des équipements, mais aussi être utilisés pour des activités de maintenance. Ces solvants peuvent se retrouver dans des réseaux d'eaux (usées, industrielles…).	Les solvants peuvent provoquer des atteintes cutanées (irritations et allergies).
Produits phytosanitaires	Les produits phytosanitaires sont des préparations chimiques généralement utilisées pour lutter contre les organismes nuisibles (plantes, champignons, insectes).	De par leur nature, les produits phytosanitaires sont nocifs pour l'environnement et la santé humaine. Les expositions importantes peuvent causer directement des lésions graves de la peau ou des intoxications majeures. Des effets à plus long terme sont possibles comme la perturbation endocrinienne.
Fibres synthétiques	Les fibres synthétiques peuvent être de nature organique ou inorganique. Elles peuvent avoir pour origine les matériaux d'isolation ou peuvent être alliées à d'autres substances dans le béton ou la peinture.	Les effets potentiels de la présence de fibres synthétiques dans l'eau sont des atteintes cutanées (irritations et allergies).
Plastiques	Les plastiques dans les eaux peuvent provenir de différentes activités humaines (véhicules transport, bâtiments, etc.).	Certains composés plastiques comme le bisphénol A sont connus pour être des perturbateurs endocriniens et provoquer des tumeurs cancéreuses de la prostate et du sein.
Agents infectieux	Des agents infectieux, principalement des micro-organismes (bactéries, champignons, moisissures…) peuvent se développer dans les eaux usées en se nourrissant de la pollution organique contenue dans ces eaux.	Les effets des agents pathogènes microbiologiques sont divers et dépendent de l'agent en cause, des conditions d'exposition et des facteurs individuels de l'individu exposé. L'exposition par inhalation, ingestion, voire cutanée, à des agents pathogènes peut entraîner quatre types de répercussions sur la santé : des infections, des allergies, des chocs toxiques (effets de toxines) et potentiellement des cancers.

Les sources d'émissions chimiques liquides du projet global Cigéo sont détaillées dans le chapitre 5.1 du volume IV de la présente étude d'impact.

3.1.1.2 Effluents chimiques liquides en phase d'aménagements préalables

Les sources d'émissions chimiques liquides en phase d'aménagements préalables du centre de stockage Cigéo intègrent celles de la construction des opérations des autres maîtres d'ouvrage (cf. Chapitre 5 du volume II de la présente étude d'impact).

En phase d'aménagements préalables, les sources d'émissions liquides chimiques sont les eaux de ruissellement sur les surfaces concernées par les travaux, les eaux industrielles générées par les installations de chantier, les eaux de pompage dans le cadre d'essais dans les forages et les eaux usées.

Les eaux de ruissellement sont susceptibles de contenir :

- de la matière inerte en suspension liée aux terrassements voire à la production de béton ;
- de la matière inerte en suspension et des traces d'hydrocarbures liées aux travaux d'aménagement des réseaux et des voiries ;
- des traces de carburants issues d'un éventuel déversement accidentel lié à la présence d'engins et de matériels de chantier à moteur thermique, ainsi que de dispositifs de distribution de carburant.

Les eaux industrielles et usées peuvent contenir de l'azote, du phosphore total, des métaux lourds (cuivre, plomb, zinc, cadmium), des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des sulfates.

3.1.1.3 Effluents chimiques liquides en phase de construction initiale

Les sources d'émissions chimiques liquides en phase de construction initiale du centre de stockage Cigéo intègrent celles de l'exploitation des opérations des autres maîtres d'ouvrage (cf. Chapitre 5 du volume II de la présente étude d'impact).

Pendant la phase de construction initiale, les sources d'émissions liquides chimiques sont les eaux de ruissellement sur les verses, les eaux pluviales des zones puits et descenderie et des infrastructures de transport, les eaux de fond (dont les eaux d'exhaure lors des travaux de creusement) et les eaux usées en lien avec les installations de chantier. Ces émissions sont susceptibles de contenir :

- de la matière en suspension dans les eaux de ruissellement qui proviennent des verses et des zones de terrassements des voiries, ainsi que dans les eaux de fond (eaux d'exhaure du creusement des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo) ;
- des traces d'hydrocarbures liées aux engins et matériels de chantier et de creusement. Ces traces d'hydrocarbures peuvent se retrouver dans les eaux de ruissellement et les eaux de fond ;
- de la matière en suspension, de l'azote, du phosphore total, des métaux lourds (cuivre, plomb, zinc, cadmium), des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des sulfates contenus dans les eaux usées de chantier. Ces eaux peuvent également contenir des agents microbiologiques ;
- des sulfates, de la matière en suspension et des métaux lourds associés (tels que le nickel, plomb, zinc, silicium, arsenic, argent…) issus des eaux de ruissellement sur les verses au droit de la zone puits du centre de stockage Cigéo ;
- des traces d'hydrocarbures, de matière en suspension et de métaux lourds contenues dans les eaux d'assainissement des infrastructures de transport en exploitation (circulation les voiries en construction du centre de stockage Cigéo, sur la déviation de la route départementale D60/960, sur la liaison intersites, sur l'installation terminale embranchée et sur la ligne ferroviaire 027000).

3.1.1.4 Effluents chimiques liquides en phase de fonctionnement

En phase de fonctionnement, le volume des travaux est beaucoup plus faible car il est uniquement lié à l'extension progressive des ouvrages souterrains du centre de stockage. En conséquence, les sources d'émissions liquides chimiques de la phase de construction initiale sont toujours présentes mais dans une moindre proportion.

À ces émissions, s'ajoutent les eaux de fonctionnement des installations industrielles du centre de stockage Cigéo (condensats des batteries froides des installations conventionnelles/des équipements/lavage des matériels, véhicules et des sols…). Les eaux industrielles dans l'installation souterraine sont gérées avec les eaux d'exhaure et ne modifient pas la nature chimique des eaux de fond. Les eaux industrielles des installations de surface du centre de stockage Cigéo sont gérées avec les eaux usées regroupant les eaux « vannes » (WC) et les eaux « grises » (douches/bains, lavabos, cuisine…).

En situation de fonctionnement normal, grâce à leurs propriétés de confinement les colis de déchets radioactifs ne sont pas une source d'émissions de substances chimiques.

3.1.1.5 Conclusions

Les sources d'effluents chimiques liquides du centre de stockage Cigéo sont les eaux générées et/ou gérées sur les différents lieux d'implantation et pendant toutes les phases de vie du projet (eaux pluviales, eaux de ruissellement sur les verses, eaux usées et eaux de fond).

Les incidences potentielles des émissions chimiques liquides sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées.

3.1.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques liquides, ainsi que leurs effets attendus et leurs modalités de suivi sont présentés dans le chapitre 5 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les principales mesures d'évitement mises en place en lien avec les émissions chimiques liquides sont les suivantes :

- E2.1b : utilisation des routes et chemins existants à proximité des cours d'eau de façon préférentielle pour éviter des traversées de cours d'eau, même provisoires par les différentes activités de travaux ;
- E3.1a : limitation du nombre de bases vie afin d'éviter des incidences supplémentaires sur les eaux superficielles ;
- E2.1z : absence de travaux dans le lit mineur d'un cours d'eau.

Les principales mesures de réduction mises en place en lien avec les émissions chimiques liquides sont les suivantes :

- R2.1z : organisation globale du chantier, qui prévoit notamment des principes d'organisation permettant de réduire les incidences du chantier sur la qualité des eaux souterraines et superficielles (l'utilisation de produits éco-responsables privilégiée, mise en place de dispositifs de stockage adaptés pour les produits dangereux, etc.) ;
- R2.1d : mise en place de dispositifs de traitement des rejets des eaux pluviales pour ne pas altérer la qualité des eaux superficielles et des souterraines par transfert ;
- R2.2q : mise en place d'un dispositif de traitement complémentaire des eaux de ruissellement des verses ;
- R2.2z : mise en place d'une gestion des eaux industrielles et des eaux usées selon les principes de l'assainissement collectif (et non collectif pour les eaux usées durant la phase d'aménagements préalables) ;
- R2.1z : mise en place d'un dispositif de traitement des eaux de fond par zone » pour un rejet conforme au bon état chimique et écologique des eaux superficielles ;
- R2.2o : respect de la politique zéro phyto pour limiter l'apport de produits chimiques dans les eaux superficielles lors de l'entretien des accotements et espaces verts ;
- R2.2z : utilisation de sels en solution sous forme de saumure pour limiter l'apport de sel dans les eaux superficielles en saison hivernale ;
- R2.1r : remise en état des zones d'intervention ;
- R2.1d : mise en place de dispositifs de stockage adaptés pour les produits dangereux ;
- R2.1a : aucun rejet d'eau non traitée dans les cours d'eau.

Ces mesures permettent d'obtenir des eaux rejetées de bonne qualité chimique et écologique avec des paramètres contrôlés inférieurs aux seuils de qualité définis par la directive-cadre sur l'eau (23) et l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface (24) et assurent ainsi la bonne qualité des eaux rejetées.

3.1.3 Incidences résiduelles

Ce chapitre présente l'évaluation quantitative du risque chimique sur la santé humaine associée aux rejets chimiques liquides du projet de centre de stockage Cigéo pendant la phase de fonctionnement qui correspond à la phase représentative des expositions maximales et continues aux populations humaines.

L'évaluation du risque chimique sur la santé humaine comprend quatre étapes (20) :

- l'évaluation des émissions de l'installation, voies d'exposition et populations considérées ;
- l'identification des dangers et relations dose-réponse ;
- l'analyse des expositions chimiques liquides ;
- l'évaluation quantitative du risque sanitaire lié aux émissions chimiques liquides.

3.1.3.1 Évaluation des émissions de l'installation, voies d'exposition et populations

3.1.3.1.1 Sources d'émissions chimiques liquides

En phase de fonctionnement, les rejets chimiques liquides (dits « rejets conventionnels ») générés par le projet de centre de stockage Cigéo sont :

- les **eaux pluviales** ruisselant et collectées sur les surfaces imperméabilisées (voiries, toitures, parkings…) et certaines surfaces artificialisées (espaces verts, etc.) ;
- les **eaux de ruissellement des verses** qui font l'objet d'une attention particulière (gestion et traitement spécifiques) et qui sont donc identifiées comme un « type d'eau » spécifique ;
- les **eaux usées** comprenant les eaux usées domestiques (effluents issus des sanitaires, des lavabos, des douches et des réfectoires) et les eaux industrielles de surface (eaux issues d'activités industrielles conventionnelles, aires de lavage…) ;
- les **eaux de fond** comprenant les eaux d'exhaure, les eaux industrielles de fond (eaux de lavage, eaux liées au fonctionnement du tunnelier) et les eaux des tests de prises incendie.

Par ailleurs, pendant le fonctionnement du projet de centre de stockage Cigéo, certains effluents collectés dans les zones à production possible de déchets nucléaires (par exemple, lors d'opérations de décontamination à la suite de contrôles radiologiques) ou dans le système de collecte des eaux d'exhaure des alvéoles HA (eaux ayant été au contact des colis de déchets) peuvent contenir des substances radioactives. Ces effluents liquides, dits « non conventionnels » ne sont pas rejetés localement et font l'objet d'une gestion distincte. Ils ne sont jamais mélangés aux eaux conventionnelles que ce soit en surface ou au fond.

Les rejets « conventionnels » se font dans les cours d'eau de La Bureau, l'Orge et l'Ormançon qui peuvent se retrouver dans des épisodes d'assec.

Les catégories des eaux rejetées dans chaque cours d'eau « récepteur » sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3-3 Catégories des eaux rejetées dans La Bureau, l'Orge et l'Ormançon

Catégories des eaux	Milieu récepteur		
	La Bureau	Orge	Ormançon
Eaux pluviales	Oui	Oui	Oui
Eaux de ruissellement des verses	Non	Non	Oui
Eaux usées	Oui	Non	Oui
Eaux de fond	Oui	Non	Oui
Eaux contaminées ou potentiellement contaminées provenant des zones de production de déchets radioactifs (effluents non conventionnels)	Non	Non	Non

3.1.3.1.2 Concentration ajoutée en substances toxiques chimiques dans les eaux superficielles en aval des rejets

La qualité des eaux rejetées doit être compatible avec les objectifs de qualité attribués au cours d'eau récepteur, soit le bon état écologique et chimique. En effet, l'hypothèse de base est de considérer que les cours d'eau qui recevront les eaux traitées se retrouveront en période d'assec, donc sans aucun volume d'eau naturelle pour diluer ces effluents. Par conséquent, les eaux conventionnelles traitées représenteront, au moins une fois dans l'année, 100 % de l'eau des ruisseaux, donc sans dilution de l'eau de surface.

Pour les substances toxiques chimiques considérées dans l'évaluation, les valeurs de rejet retenues pour le centre de stockage Cigéo sont présentées dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4 Valeurs de rejet retenues pour le centre de stockage Cigéo

Substances toxiques chimiques	Valeur (µg/L)	Référence
As	0,83	Arrêté du 25 janvier 2010 (24)
Benzo(a)pyrène	0,00017	Arrêté du 25 janvier 2010
Cd*	0,25	Arrêté du 25 janvier 2010
Cu	1	Arrêté du 25 janvier 2010
Cr	3,4	Arrêté du 25 janvier 2010
Hg**	0,07	Arrêté du 25 janvier 2010
Pb	1,2	Arrêté du 25 janvier 2010
Ni	4	Arrêté du 25 janvier 2010
Se***	10	Arrêté eau potable (22)
Zn	7,8	Arrêté du 25 janvier 2010
U	30	OMS (25)

* La valeur tient compte de la dureté l'eau (classe 5).

** La valeur retenue correspond à la norme de qualité environnementale en concentration maximale admissible (NQE-CMA). La norme de qualité environnementale en moyenne annuelle (NQE-MA) est utilisée pour les autres substances toxiques chimiques comme valeur de rejet, mais n'est pas disponible pour le mercure.

*** La valeur retenue est celle applicable à la date de dépôt de la DAC en janvier 2023. Depuis que l'arrêté eau potable (22) a été modifié en 2023, la limite de qualité pour le sélénium est fixée à 20 µg/L.

Les eaux pluviales ne sont pas concernées par ces valeurs de rejet. Il est uniquement fixé une valeur de rejet pour les hydrocarbures totaux à 5 mg/L.

3.1.3.1.3 Voies d'exposition considérées et populations exposées

a) Voies d'exposition

L'utilisation des eaux superficielles est présentée dans le volume III de la présente étude d'impact. .

Les habitudes locales montrent que les ruisseaux de l'Orge, de La Bureau et de l'Ormançon ne sont pas utilisés pour l'alimentation en eau potable, ni pour l'abreuvement des animaux de basse-cour, ni pour l'irrigation (grandes cultures céréalières ou jardin potager), ni pour la consommation de poissons de rivière issus de la pêche de loisir. Le transfert par l'eau ne concerne donc que l'ingestion de produits animaux bovins et de gibier qui auraient été exposés à la suite de l'abreuvement direct des animaux dans les ruisseaux.

Le groupe « Multi-activités » est caractérisé par un comportement moyen (consommations et autoconsommations moyennes) représentatif du site et considéré comme le cas de référence.

Ainsi, les émissions liquides peuvent induire un risque pour la santé *via* l'ingestion correspondant au transfert dans l'organisme lors de la consommation d'aliments produits localement (lait, produits laitiers et viandes) et issus des bovins et des gibiers. Les substances toxiques chimiques sont ingérées par les bovins et par les gibiers par abreuvement direct dans les ruisseaux de l'Orge, de La Bureau et de l'Ormançon. Le scénario retenu correspond à un habitant qui ingère des produits animaux bovins (viande, lait/produits laitiers) et gibiers *via* sa ration alimentaire. Les quantités ingérées et le niveau d'autarcie ont été établis par l'enquête alimentaire de l'Observatoire pérenne de l'environnement réalisée en 2013 (26).

Le schéma conceptuel d'exposition est présenté dans la figure 3-1.

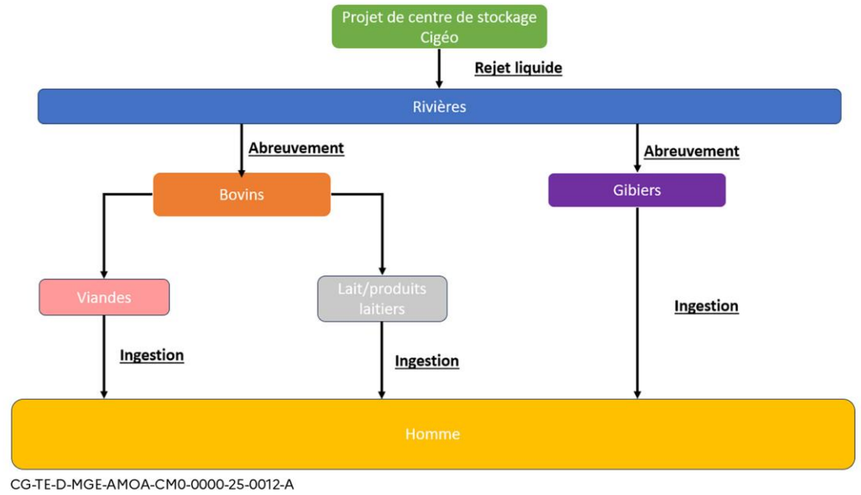


Figure 3-1 Schéma conceptuel pour les rejets liquides

b) Populations exposées

La définition des populations exposées s'appuie sur le choix de populations (personnes représentatives des groupes de référence) qui pourraient exister réellement dans les environs du projet de centre de stockage Cigéo. Il est retenu pour l'évaluation de l'impact des rejets liquides une localisation qui maximise la concentration en substances toxiques chimiques dans l'eau.

Le groupe de référence concerné par le risque chimique est localisé sur la commune de Bure car située à proximité des rejets du centre de stockage Cigéo. Ce groupe de référence correspond également à un des points cibles étudiés pour les émissions atmosphériques.

Le groupe de référence est un groupe multi-activités qui possède des activités :

- de chasse de gibiers ;
- d'élevage de bovins.

Il est considéré que les bovins et les gibiers s'abreuvent dans les ruisseaux de l'Orge, de La Bureau et de l'Ormançon. La figure 3-2 présente la localisation du groupe de référence retenu pour l'évaluation de l'impact des rejets liquides du projet de centre de stockage Cigéo.

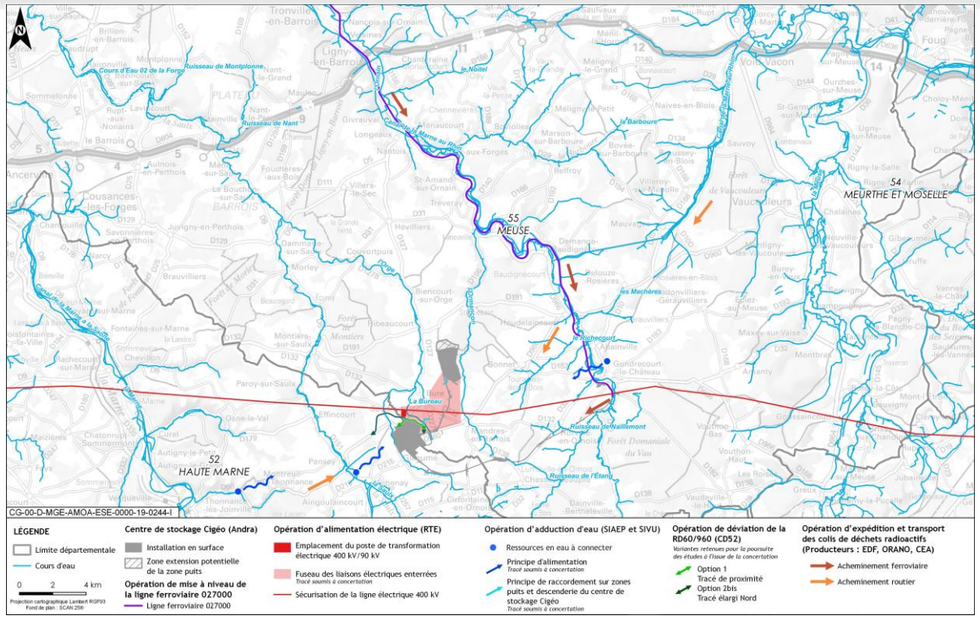


Figure 3-2 *Localisation du groupe de référence situé à Bure et des ruisseaux de l'Orge, de La Bureau et de l'Ormançon*

3.1.3.2 Identification des dangers et des relations dose-réponse

3.1.3.2.1 Choix des traceurs de risque et identification des dangers

Les traceurs de risque sont les substances toxiques chimiques émises susceptibles de générer des effets sanitaires chez les personnes qui y sont exposées. Ils sont choisis sur la base de l'existence de valeurs toxicologiques de références (VTR), ou à défaut de valeurs réglementaires ou de gestion.

La liste des substances toxiques chimiques qui sont retenues s'appuie sur les composés chimiques dangereux et présents dans les effluents liquides du projet global Cigéo. Pour l'Homme, les composés chimiques identifiés comme dangereux (existence d'une valeur de référence) et dont les transferts à l'Homme (via la biosphère) sont susceptibles d'être modélisés sont les suivants : arsenic, benzo(a)pyrène, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, sélénium, uranium et zinc.

Le chrome possède des VTR en fonction de deux degrés d'oxydation (chrome III et chrome VI). Le chrome III et le chrome VI sont retenus comme traceurs de risque pour le chrome. De même, pour le mercure, il existe des VTR pour le mercure organique et le mercure inorganique qui sont retenus comme traceurs des risques.

Il n'existe pas de VTR ou à défaut de valeur de réglementaire ou de gestion, autre que les 5 mg/L pour les hydrocarbures totaux. En conséquence, il n'a pas été retenu de traceur de risque pour les hydrocarbures totaux contenus dans les rejets des eaux pluviales.

Les traceurs de risque retenus pour l'évaluation des risques associée aux substances toxiques chimiques émises sont restitués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-5 *Traceurs de risques associés à la toxicité chimique chronique des substances toxiques chimiques*

Substances toxiques chimiques	Traceurs de risque
Arsenic	L'**arsenic** (As) est le traceur de risque
Benzo(a)pyrène	Le **benzo(a)pyrène** (BaP) est le traceur de risque
Cadmium	Le **cadmium** (Cd) est le traceur de risque
Chrome	Le **chrome III** (Cr III) et le **chrome VI** (Cr VI) sont les traceurs de risque
Cuivre	Le **cuivre** est le traceur de risque
Plomb	Le **plomb** est le traceur de risque
Mercure	Le **mercure inorganique** (Hg_{inor}) et le **mercure organique** (Hg_{or}) sont les traceurs de risque
Nickel	Le **nickel** (Ni) est le traceur de risque
Sélénium	Le **sélénium** (Se) est le traceur de risque
Uranium	L'**uranium (U)** est le traceur de risque
Zinc	Le **zinc** (Zn) est le traceur de risque

La nature des effets potentiels des substances toxiques chimiques émises est présentée dans le tableau 3-2.

3.1.3.2.2 Choix des relations dose-réponse

En phase de fonctionnement, l'évaluation du risque sanitaire prend en compte uniquement les expositions chroniques. Ce chapitre a pour but d'établir le lien entre la concentration à laquelle est soumis l'organisme de façon chronique et l'incidence de l'apparition d'un effet toxique jugé critique pour l'organisme. Elle se caractérise par le choix des valeurs de référence associées aux traceurs identifiés au chapitre 3.2.3.2.1 du présent document.

La méthodologie Ineris recommande de réaliser l'évaluation des risques sanitaires à l'aide des valeurs toxicologiques de référence (VTR) (20). Ces valeurs permettent de définir la relation quantitative entre un niveau d'exposition et la possibilité ou la probabilité d'apparition d'un effet critique, dénommée « relation dose-effet » ou « dose-réponse ». Les VTR sont établies sur la base d'une analyse des connaissances toxicologiques et épidémiologiques actuellement disponibles.

Les VTR sont recherchées parmi les bases de données suivantes :

- l'Anses Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail ;
- l'US-EPA : *United-States-Environmental Protection Agency* ;
- ATSDR : *Agency for Toxic Substances and Disease Registry ;*
- l'OMS : Organisation mondiale de la santé ;
- la *Health Canada* : Santé Canada ;
- le RIVM : Institut national de santé publique et de l'environnement des Pays-Bas ;
- l'OEHHA : *Office of Environmental Health Hazard Assessment ;*
- l'EFSA : *European Food Safety Authority.*

Les VTR sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 3-6 VTR pour les voies orales associées aux effets cancérigènes (sans seuil) (ERU)

Traceur chimique	$VTR_{ingestion}$ = ERU[7] (µg/kg/j)$^{-1}$	Source
As	$1{,}5.10^{-3}$	US-EPA,1998, OEHHA, 2005
Benzo(a)pyrène	1.10^{-3}	US-EPA, 2017
Cr (VI)	3.10^{-4}	US-EPA, 2024
Pb	$8{,}5.10^{-6}$	OEHHA, 2005

Tableau 3-7 VTR pour les voies orales associées aux effets non cancérigènes (à seuil)

Traceur chimique	$VTR_{ingestion}$ (µg/kg/j)	Sources
As	0,3	HAS, 2020
Benzo(a)pyrène	0,31	US-EPA, 2017
Cd	0,35	Anses, 2017
Cu	150	EFSA, 2018
Cr (III)	5	RIVM, 2001
Cr (VI)	2,2	Santé Canada 2021
Hg (inorganique)	0,6	EFSA, 2012, Anses 2018
Hg (organique)	0,1	US-EPA, 2001
Pb*	0,63	Anses, 2013
Ni	13	EFSA, 2020
Se	3,6	EFSA, 2023
U	0,2	ATSDR, 2013
Zn	300	US-EPA, 2005

*Correspondance dans le rapport : Anses, 2013. Expositions au plomb : effets sur la santé associés à des plombémies inférieures à 100 µg/L.

Les valeurs de VTR présentées sont les plus récentes et disponibles à la date de l'évaluation. Une veille et le choix des VTR à retenir pour les évaluations de risques font l'objet d'une prestation réalisée par l'Ineris.

[7] ERU : excès de risque unitaire
[8] Le code de calcul de Cadho se réfère aux bases de données radio-écologiques et par souci de cohérence avec les évaluations réalisées pour les rejets radiologiques les paramètres radio écologiques ont été repris pour les évaluations chimiques.

3.1.3.3 Analyse des expositions chimiques liquides

La méthode de calcul utilisée est le modèle CADHO qui permet la simulation des transferts et le calcul de risque pour toutes les substances toxiques chimiques.

Les données d'entrée du modèle CADHO sont groupées en trois catégories :

- les contaminations ou rejets ;
- les paramètres contextuels ou de « biosphère » ;
- les paramètres (radio-)écologique et de transfert[8].

Les consommations de produits animaux bovins et gibiers, établies par le niveau d'autarcie issu de l'enquête alimentaire de 2013 (26), sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3-8 Consommations de produits animaux bovins et gibiers

Catégories alimentaires	Niveau d'autarcie (%)	Quantités ingérées par un adulte (kg/an)	Ratio 10 ans/ adulte	Enfant 10 ans	Ratio enfant 1 an/adulte	Enfant 1 an
Viande (bovin)	23	4	0,76	3,04	0,43	1,72
Lait (vache laitière)	17	13	1,77	23,01	1,25	16,25
Autres produits laitiers (vache laitière)	10	2	1,12	2,24	1,26	2,52
Gibier (chevreuil assimilé mouton)	100	5	0,76	3,8	0,43	2,15

Le niveau d'exposition aux substances toxiques chimiques pour le groupe de référence est évalué par la dose journalière d'exposition (ingérée) en fonction du poids corporel (pc) (µg/kg.pc/j) pour chaque traceur de risque. Les traceurs de risque sont présentés dans le chapitre 3.1.3.2.1 du présent volume. Les niveaux d'exposition sont calculés à partir des concentrations ajoutées dans les cours d'eau présentées au chapitre 3.1.3.1.2 du présent volume.

Trois classes d'âges ont été retenues pour calculer le niveau d'exposition (dose journalière d'exposition - DJE) pour le groupe de référence : l'adulte, l'enfant de 10 ans, et l'enfant d'un an. Les poids corporels associés à ces classes d'âges sont respectivement 70 kg[9], 32 kg et 8 kg pour l'adulte, l'enfant de 10 ans et l'enfant d'un an (27).

Le code de calcul actuellement utilisé par l'Andra ne permet pas de calculer les niveaux d'exposition pour les molécules organiques. Le niveau d'exposition pour le benzo(a)pyrène n'a donc pas pu être calculé à ce stade. Le développement du code de calcul Cadho est en cours pour permettre de calculer les niveaux d'exposition pour les molécules organiques, dont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Les estimations des doses journalières obtenues pour les traceurs de risque par le code de calcul Cadho sont présentées dans le tableau ci-dessous.

[9] Masse corporelle de 73 kg a été arrondie à 70 kg en cohérence avec les évaluations de risque radiologique

Tableau 3-9 Doses journalières ingérées estimées par traceur chimique pour le groupe de référence (adulte, enfant de 10 ans et enfant d'un an)

Traceur chimique	Doses journalières d'exposition estimées (µg/kg.pc/j)		
	Adulte	Enfant de 10 ans	Enfant d'un an
As	$7{,}23 \times 10^{-4}$	$1{,}43 \times 10^{-3}$	$3{,}03 \times 10^{-3}$
Cd	$9{,}53 \times 10^{-6}$	$1{,}91 \times 10^{-5}$	$4{,}10 \times 10^{-5}$
Cr III	$8{,}29 \times 10^{-5}$	$2{,}38 \times 10^{-4}$	$6{,}28 \times 10^{-4}$
Cr VI	$9{,}83 \times 10^{-5}$	$1{,}66 \times 10^{-4}$	$3{,}05 \times 10^{-4}$
Cu	$9{,}43 \times 10^{-4}$	$1{,}75 \times 10^{-3}$	$3{,}54 \times 10^{-3}$
Hg inorg	$4{,}10 \times 10^{-5}$	$1{,}16 \times 10^{-4}$	$3{,}04 \times 10^{-4}$
Hg org	$3{,}93 \times 10^{-4}$	$1{,}13 \times 10^{-3}$	$2{,}99 \times 10^{-3}$
Ni	$2{,}93 \times 10^{-4}$	$7{,}46 \times 10^{-4}$	$1{,}86 \times 10^{-3}$
Pb	$1{,}84 \times 10^{-5}$	$4{,}62 \times 10^{-5}$	$1{,}14 \times 10^{-4}$
Se	$8{,}86 \times 10^{-3}$	$1{,}76 \times 10^{-2}$	$3{,}78 \times 10^{-2}$
U	$2{,}48 \times 10^{-3}$	$7{,}81 \times 10^{-3}$	$2{,}14 \times 10^{-2}$
Zn	$2{,}97 \times 10^{-4}$	$5{,}95 \times 10^{-5}$	$1{,}28 \times 10^{-3}$

3.1.3.4 Évaluation quantitative du risque sanitaire lié aux émissions chimiques liquides

3.1.3.4.1 Polluants à effet de seuil

Pour les substances toxiques chimiques à effets de seuil, pour la voie ingestion, l'indicateur de risque est le quotient de danger correspondant au rapport entre la dose journalière d'exposition estimée et la valeur toxicologique de référence.

$$QD=DJE/VTR$$

Avec : DJE : dose journalière d'exposition (en $\mu g.kg^{-1}.j^{-1}$)/VTR : valeur toxicologique de référence pour un effet à seuil (en $\mu g.kg^{-1}.j^{-1}$).

Si le QD est inférieur à 1, le risque peut être considéré comme « non préoccupant ».

Tableau 3-10 Quotient de danger pour les effets avec seuil pour le groupe de référence (adulte, enfant de 10 ans et enfant d'un an)

Traceurs de risque	Quotient de danger (QD)		
	Adulte	Enfant de 10 ans	Enfant d'un an
Arsenic	$2{,}41 \times 10^{-3}$	$4{,}76 \times 10^{-3}$	$1{,}01 \times 10^{-2}$
Cadmium	$2{,}72 \times 10^{-5}$	$5{,}45 \times 10^{-5}$	$1{,}17 \times 10^{-4}$
Chrome III	$1{,}66 \times 10^{-5}$	$4{,}76 \times 10^{-5}$	$1{,}26 \times 10^{-4}$
Chrome VI	$4{,}47 \times 10^{-5}$	$7{,}54 \times 10^{-5}$	$1{,}39 \times 10^{-4}$
Cuivre	$6{,}29 \times 10^{-6}$	$1{,}17 \times 10^{-5}$	$2{,}36 \times 10^{-5}$
Mercure inorganique	$6{,}84 \times 10^{-5}$	$1{,}93 \times 10^{-4}$	$5{,}07 \times 10^{-4}$
Mercure organique	$3{,}93 \times 10^{-3}$	$1{,}13 \times 10^{-2}$	$2{,}99 \times 10^{-2}$
Nickel	$2{,}25 \times 10^{-5}$	$5{,}74 \times 10^{-5}$	$1{,}43 \times 10^{-4}$
Plomb	$2{,}92 \times 10^{-5}$	$7{,}33 \times 10^{-5}$	$1{,}81 \times 10^{-4}$
Sélénium	$2{,}46 \times 10^{-3}$	$4{,}88 \times 10^{-3}$	$1{,}05 \times 10^{-2}$
Uranium	$1{,}24 \times 10^{-2}$	$3{,}90 \times 10^{-2}$	$1{,}07 \times 10^{-1}$
Zinc	$9{,}91 \times 10^{-7}$	$1{,}98 \times 10^{-6}$	$4{,}26 \times 10^{-6}$

Tous les traceurs de risque possèdent une VTR à effets à seuil (cf. Tableau 3-7). Les quotients de danger calculés pour le groupe de référence dans le tableau précédent sont inférieurs à 1 pour toutes les tranches d'âge. Ainsi, le risque est considéré non préoccupant pour les substances toxiques chimiques disposant de VTR à effets à seuil.

3.1.3.4.2 Polluants à effet sans seuil

Pour les substances toxiques chimiques à effets sans seuil, l'indicateur de risque est l'excès de risque individuel (ERI). Pour l'ingestion, il est calculé à partir de la dose journalière d'exposition (DJE), du temps d'exposition (Ti) et de la durée de vie (Tm) comme suit :

$$ERI = \frac{\sum_i DJE \times Ti}{Tm} \times ERU$$

Avec :

DJE : dose journalière d'exposition (en $\mu g.kg^{-1}.j^{-1}$).

Ti : durée d'exposition en années.

Tm : durée de vie fixée en années.

ERU : excès de risque unitaire (VTR sans seuil $(\mu g/kg/j)^{-1}$ - voie ingestion).

Si l'ERI est inférieur à 10^{-5}, le risque peut être considéré comme « non préoccupant ».

La durée de vie (Tm) est par convention de 70 ans (20).

La durée d'exposition (Ti) retenue est de 30 ans généralement admise pour l'adulte résidant à un endroit.

Pour l'enfant de 10 ans et l'enfant d'un an, il a été considéré que les durées d'exposition sont respectivement 10 ans (entre 5 et 15 ans) et 5 ans (entre sa naissance et 5 ans).

L'excès de risque vie entière (cumul) a été calculé pour une exposition de 70 ans aux traceurs de risque (adulte exposé pendant 55 ans, enfant de 10 ans exposé pendant 10 ans et enfant d'un an exposé pendant 5 ans).

Les traceurs possédant une VTR à effets sans seuil sont l'arsenic (ERU = 1,5 x 10^{-3} $(\mu g/kg/j)^{-1}$), le chrome VI (ERU = 3 x 10^{-4} $(\mu g/kg/j)^{-1}$) et le plomb (ERU = 8,5.10^{-6} $(\mu g/kg/j)^{-1}$) (cf. Tableau 3-6).

Les excès de risque individuel (ERI) du groupe de référence (adulte, enfant 10 ans, enfant d'un an et cumul sur 70 ans) sont très largement inférieurs à 10^{-5} comme présenté dans le tableau suivant. Le risque est donc considéré non préoccupant.

Tableau 3-11 Excès de risque individuel (ERI) pour les substances toxiques chimiques disposant d'une VTR sans seuil

Traceurs de risque	Excès de risque individuel				
	Adulte (exposition 30 ans)	Adulte (exposition 55 ans)	Enfant de 10 ans	Enfant d'un an	Cumul pour une durée d'exposition de 70 ans
Arsenic	$4,65 \times 10^{-7}$	$8,52 \times 10^{-7}$	$3,06 \times 10^{-7}$	$3,25 \times 10^{-7}$	$1,48 \times 10^{-6}$
Chrome VI	$1,26 \times 10^{-8}$	$2,32 \times 10^{-8}$	$7,11 \times 10^{-9}$	$6,53 \times 10^{-9}$	$3,68 \times 10^{-8}$
Plomb	$6,71 \times 10^{-11}$	$1,23 \times 10^{-10}$	$5,61 \times 10^{-11}$	$6,94 \times 10^{-11}$	$2,48 \times 10^{-10}$

3.1.3.5 Appréciation des incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions chimiques liquides

L'évaluation du risque chimique associé aux rejets chimiques liquides du projet de centre de stockage Cigéo pendant la phase de fonctionnement montre que le risque pour la santé humaine est considéré comme non préoccupant sur la base des valeurs de rejet retenues pour le centre de stockage Cigéo.

Les incidences résiduelles des effluents chimiques liquides du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

3.2 Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques sur la santé humaine

L'aire d'étude rapprochée du milieu physique (cf. Chapitre 1.2 du volume VII de la présente étude d'impact), incluant les lieux de vie à proximité du projet, est située sur un territoire rural, le trafic y est faible tout comme le nombre d'industries émettrices de polluants. Les concentrations actuelles en polluants (dioxyde de soufre, oxyde d'azote, monoxyde de carbone, benzène, benzo(a)pyrène, PM_{10} et $PM_{2,5}$ et éléments traces métalliques) mesurées sur l'aire d'étude à la station atmosphérique d'Houdelaincourt respectent les valeurs limites pour la protection de la santé humaine et quasiment tous les objectifs de qualité de l'air indiqués dans la règlementation à l'exception de l'ozone et des particules de diamètre inférieur à 2,5 µm ($PM_{2,5}$) (cf. Chapitre 2.5 du volume III de la présente étude d'impact). Les pics d'ozone enregistrés sont liés à des conditions anticycloniques temporaires, classiquement rencontrées dans de nombreuses régions françaises. Les pics de $PM_{2,5}$ mesurés sont liés à l'activité agricole (labourage, moisson…).

3.2.1 Incidences potentielles

3.2.1.1 Généralités

Les émissions atmosphériques chimiques peuvent avoir des effets sur la santé de diverses natures : irritations, cancers, allergies, troubles respiratoires… Les effets potentiels pour la santé humaine des émissions atmosphériques chimiques sont présentés dans le tableau 3-12 ci-après.

Tableau 3-12 Caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques contenus dans les émissions atmosphériques du projet global Cigéo

Composés chimiques	Caractéristiques	Effets potentiels sur la santé
Poussières (PM_{10} et $PM_{2,5}$)	Les poussières constituent un complexe de substances organiques ou minérales. Les grosses particules (supérieures à 10 µm) sont formées par des processus mécaniques tels que l'érosion et les éruptions. Les autres particules, PM_{10} (inférieures à 10 µm) et $PM_{2,5}$ (inférieures à 2,5 µm), résultent majoritairement de processus de combustion (industrie, chauffage, transport…). L'une des principales sources de poussières provient des verses majoritairement composées des argilites et générées par le creusement des installations souterraines du centre de stockage Cigéo. Comme indiqué dans le chapitre 4.3.2.6 du volume III de la présente étude d'impact, les argilites de l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien sont composées d'environ 40 % de minéraux argileux, muscovite et biotite, 30 % de carbonates, principalement de la calcite et 25 % de tectosilicates (quartz et feldspaths).	Le degré de toxicité des poussières dépend de leur nature, dimension et association à d'autres polluants. Les particules fines peuvent irriter les voies respiratoires à faible concentration, surtout chez les personnes sensibles. Plus les particules sont fines, plus elles sont capables de pénétrer profondément dans l'arborescence pulmonaire et de passer par la circulation sanguine vers d'autres organes. Ces particules peuvent avoir des propriétés mutagène ou cancérigène.
Composés organiques volatils (COV)	Les composés organiques volatils sont gazeux. Ils proviennent du transport routier (véhicules à essence) et de l'utilisation de solvants dans les procédés industriels ou dans les colles, vernis, peintures… Les plus connus sont les BTX (benzène, toluène, xylène).	Les effets des composés organiques volatils sont divers selon les polluants et le niveau d'exposition. Ils peuvent entraîner une simple gêne olfactive ou une irritation des voies respiratoires. Dans certains cas extrêmes, ils peuvent provoquer une diminution de la capacité respiratoire. Par ailleurs, le benzène est un composé cancérigène reconnu.
Oxydes d'azote (NO, NO_x)	Les oxydes d'azote proviennent surtout des émissions des véhicules et des installations de combustion. Ces émissions sont produites sous la forme de monoxyde d'azote (NO) à près de 90 % et dans une moindre mesure sous la forme de dioxyde d'azote (NO2).	Le monoxyde d'azote n'est pas toxique pour l'homme contrairement au dioxyde d'azote. Le dioxyde d'azote peut entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyperactivité bronchique. En plus, chez les enfants et les asthmatiques, il peut augmenter la sensibilité des bronches aux infections microbiennes.
Oxydes de carbone (CO)	Les oxydes de carbone proviennent essentiellement de la combustion de carburant fossile pour le transport, le chauffage et les activités industrielles. Le dioxyde de carbone est produit lors de la combustion complète de carburant alors que la formation de monoxyde de carbone résulte d'une combustion incomplète.	Le dioxyde de carbone n'a pas d'effet connu sur la santé. Le monoxyde de carbone peut, dès de faibles doses, provoquer un syndrome grippal, une dépression, des douleurs thoraciques, ou des maux de tête, voire des migraines. À forte dose, le monoxyde de carbone entraine des dommages permanents à certains organes dont le cerveau et le cœur. Les manifestations cliniques de ces dommages peuvent conduire à de la tachycardie, de l'hypertension, des céphalées, des vertiges, des convulsions et des troubles de conscience, mais aussi à un œdème pulmonaire, une nécrose musculaire, etc., voire à un arrêt respiratoire.
Oxydes de soufre (SO, SO_2)	Les oxydes de soufre proviennent essentiellement de la combustion des matières fossiles contenant du soufre (comme le fuel ou le charbon) et s'observent en concentrations légèrement plus élevées dans un environnement à forte circulation.	Les oxydes de soufres sont des gaz irritants. Des expositions courtes à des valeurs élevées (250 µg/m³) peuvent provoquer des affections respiratoires (bronchites…) surtout chez les personnes sensibles.
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont rejetés dans l'atmosphère lors de la combustion incomplète de matériaux organiques. Ils peuvent être émis par le trafic, la centrale à enrober mobile pour l'imperméabilisation des voiries en phase d'aménagements préalables et les chaudières biomasse en phase de fonctionnement.	Plusieurs hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont considérés comme cancérogènes avérés (groupe 1A du CIRC[10] pour le benzo[a]pyrène), probables (groupe 2A du CIRC pour cyclopenta[c,d]pyrène, dibenzo[a,h]anthracène et dibenzo[a,l]pyrène ou cancérogènes possibles (groupe 2C du CIRC).
Dioxines et furanes	Les dioxines (polychlorodibenzodioxines- PCDD) et les furanes (polychlorodibenzofuranes – PCDF) sont émis par les procédés industriels faisant intervenir la combustion incomplète de dérivés aromatiques chlorés ou impliquant la synthèse de dérivés chlorés : incinération, fonderie, métallurgie. La combustion de bois pour le chauffage résidentiel est également à l'origine d'émission de dioxines.	Une exposition brève de l'homme à de fortes concentrations en dioxines peut entraîner des lésions dermiques, comme la chloracné (ou acné chlorique), la formation de taches sombres sur la peau et une altération de la fonction hépatique. L'exposition de longue durée s'associe à une dégradation du système immunitaire, du développement du système nerveux, du système endocrinien et des fonctions génésiques.
Métaux (cuivre, Plomb, zinc, cadmium, silicum, arsenic, argent…)	Les métaux émis par voie atmosphérique peuvent être produits par la petite centrale à enrober mobile en phase d'aménagements préalables. Les poussières émises par les travaux de creusement et le stockage des verses sont susceptibles de contenir des constituants minéralogiques, dont des métaux.	Les effets potentiels des métaux sont présentés dans le tableau 3-2.
Hexafluorure de soufre (SF_6)	L'hexafluorure de soufre est un gaz contenu dans les postes de transformation et de livraison électriques.	L'hexafluorure de soufre est un gaz inerte qui ne présente pas d'effet toxique, mutagène ou cancérigène connu sur la santé. Toutefois, la présence d'hexafluorure de soufre dans une atmosphère confinée peut entraîner un risque d'asphyxie par diminution de la teneur en Oxygène.
Ozone (O_3)	De l'ozone est susceptible d'être créé et émis à proximité des câbles électriques à très haute tension.	L'ozone est un puissant oxydant pouvant porter atteinte aux muqueuses et tissus respiratoires. À forte concentration dans l'air, il peut provoquer des lésions pulmonaires.
Légionnelles	Les légionnelles sont des bactéries présentes naturellement dans les eaux mais elles croissent et se multiplient dans les eaux tièdes. Elles sont susceptibles de se développer dans les circuits des refroidisseurs.	Lorsqu'il y a une trop forte concentration en légionnelles et qu'on les inhale par aérosols ou microgouttelettes, elles se répandent à l'intérieur des poumons et y prolifèrent. Ces légionnelles peuvent provoquer une infection, qui peut être : • bégnine. Il s'agit d'un état grippal avec une guérison spontanée au bout de cinq jours environ ; • grave, dite « légionellose ». Il s'agit d'une infection pulmonaire aiguë qui peut entrainer un décès dans 10 % à 15 % des cas (individus fragiles).

[10] Centre international de recherche sur le cancer (CIRC)

L'ensemble des sources d'émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo sont détaillées dans le chapitre 2.4 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les émissions chimiques atmosphériques au niveau de la ligne ferroviaire 027000 et de l'installation terminale embranchée ne sont pas prises en compte dans le calcul des flux d'émissions atmosphériques. Elles sont en effet négligeables (trafic ferroviaire très limité, au maximum de huit passages de trains par jour) par rapport à celles du centre de stockage Cigéo ou du trafic sur les routes départementales. Les populations à proximité de ces voies mais éloignées du centre de stockage Cigéo sont beaucoup moins exposées aux émissions chimiques atmosphériques du centre, le risque sanitaire associé est donc plus faible.

3.2.1.2 Les émissions chimiques atmosphériques en phase d'aménagements préalables

Les sources d'émissions atmosphériques de composés chimiques du projet global Cigéo en phase d'aménagements préalables sont celles d'un grand chantier.

Il s'agit de poussières de matière minérale, d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre, de monoxyde de carbone, composés organiques volatils et hydrocarbures aromatiques polycycliques.

3.2.1.3 Les émissions chimiques atmosphériques en phase de construction initiale et de fonctionnement

Les sources d'émissions atmosphériques chimiques des installations du centre de stockage Cigéo pendant les phases de construction initiale et de fonctionnement sont :

- des sources dites « surfaciques » : ce sont les poussières qui peuvent être émises sous l'effet du vent ou de l'action humaine, comme par exemple, le dépôt des verses sur la zone puits. Ce sont également les engins de construction des ouvrages qui émettent des composés organiques volatils et polluants de type oxydes d'azote provenant des pots d'échappement mais aussi des poussières mises en suspension dans l'air sous l'action de roulage ;
- des sources dites « linéiques », principalement liées à la circulation des engins et des véhicules. Ces engins et véhicules (y compris les locotracteurs des trains circulant sur la ligne ferroviaire 027000 et l'installation terminale embranchée) sont des sources d'émission de poussières, composés organiques volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques, et de polluants de type oxydes d'azote et monoxyde de carbone. D'autres poussières (provenant du sol) peuvent aussi être mises en suspension lors du passage des véhicules ;
- des sources dites « canalisées », liées au fonctionnement des chaudières, des centrales à béton, de la ventilation des installations. Ce sont essentiellement des poussières, des oxydes de carbone, des oxydes de soufre, du monoxyde de carbone, les composés organiques volatils et hydrocarbures aromatiques polycycliques...

En situation de fonctionnement normal, grâce à leurs propriétés de confinement les colis de déchets radioactifs ne sont pas une source d'émissions de substances chimiques considérées comme dangereuses pour la santé humaine.

Pour les opérations des autres maîtres d'ouvrage, les principales sources d'émissions atmosphériques chimiques sont celles liées aux véhicules de transports (de matériaux, de colis de déchets radioactifs) nécessaires à la construction initiale et au fonctionnement du centre de stockage Cigéo. Les sources d'émissions de ces véhicules de transport sont donc les mêmes que celles des véhicules et engins du centre de stockage Cigéo.

D'autres émissions atmosphériques potentielles sont identifiées et présentées dans le tableau 3-12. Elles sont constituées de composés chimiques produits par certains ouvrages électriques, tels que l'hexafluorure de soufre ou l'ozone, et d'agents microbiologiques (légionelles) susceptibles de se développer dans les dispositifs de refroidissement.

3.2.1.4 Conclusions

Les incidences potentielles des émissions chimiques atmosphériques sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées.

3.2.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions atmosphériques, ainsi que leurs effets attendus et leurs modalités de suivi sont présentés dans le chapitre 2 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les principales mesures d'évitement mises en place en lien avec les émissions atmosphériques sont détaillées au chapitre 2.4.1.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont les suivantes :

- E2.1z : verses issues du creusement de l'installation souterraine principalement remontées sur la zone puits ;
- E3.1a : mise en place d'une bande transporteuse semi-enterrée entre la zone descenderie et la zone puits ;
- E2.1z : réutilisation de l'ancienne plateforme ferroviaire et de la ligne ferroviaire 027000 ;
- E3.1a : raccordement à la ligne THT existante la plus proche ;
- E1.1c : réutilisation de déblais en remblais ;
- E3.2b : conditionnement des déchets radioactifs (colis primaires), selon les spécifications d'acceptation fixées par l'Andra.

La mise en place de ces mesures a pour effet d'éviter les émissions de substances atmosphériques liées au trafic et aux poussières ainsi que la dissémination des substances toxiques chimiques contenues dans les déchets radioactifs. Ces mesures permettent de limiter l'exposition des populations.

Les principales mesures de réduction mises en place en lien avec les émissions atmosphériques sont détaillées au chapitre 2.4.1.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont les suivantes :

- R2.1a : prise en compte des conditions météorologiques ;
- R2.1z : mise en place de dispositifs pour limiter les émissions de poussières ;
- R2.1a : gestion optimisée des déblais et remblais permettant la réduction des distances de transport des matériaux par camion ;
- R2.1a : mise en place d'un revêtement sur les pistes principales empruntées par les véhicules ;
- R2.1a : limitation de la vitesse de circulation des véhicules ;
- R2.1g : entretien des véhicules ;
- R2.2z : émissaires de rejets canalisés en hauteur ;
- R2.2z : végétalisation des verses afin de réduire les surfaces soumises aux intempéries et au vent ;
- R2.2z : brumisation des verses non couvertes.

La mise en place de ces mesures a pour objectif de réduire les quantités émises de substances atmosphériques (poussières, oxydes de carbones, hydrocarbures, etc.) et de limiter ainsi l'exposition des populations.



Figure 3-3 *Vue de l'ancienne plateforme ferroviaire et du terrain industriel de Gondrecourt-le-Château*



Figure 3-4 Vue de l'arrosage de pistes pour limiter l'envol de poussières par temps sec

Enfin, le refroidissement des postes de transformation et de livraison électriques et la production d'eau « glacée » pour la ventilation du centre de stockage Cigéo sont effectués par des dispositifs de type « fermé ». Ce type dispositif permet d'éviter la dispersion de légionelles.

L'entretien et la surveillance des tours aéroréfrigérantes (TAR), qui ne sont pas en circuit fermé, est mis en place conformément à la réglementation.



Figure 3-5 Photographie illustrative de refroidisseurs à circuit fermé

3.2.3 Incidences résiduelles

La caractérisation des substances chimiques émises par le projet global Cigéo présentant un danger pour la santé humaine comprend une étape de détermination des substances d'intérêt et une étape d'évaluation des relations dose-réponse pour ces substances.

Les expositions humaines, par inhalation et/ou ingestion de ces substances chimiques, sont évaluées à partir de l'estimation des concentrations ajoutées dans le milieu récepteur (atmosphère, eau...) des substances chimiques présentant un danger pour la santé humaine.

Le risque sanitaire est ensuite estimé en évaluant, à l'aide des valeurs toxicologiques de référence relatives aux substances étudiées, soit des quotients de danger (QD) dans le cas des substances avec effets de seuil (substances non cancérogènes), soit des excès de risque individuel (ERI) dans le cas des substances avec effets sans seuil (substances cancérogènes). Pour les autres substances chimiques d'intérêt ne possédant de valeur toxicologique de référence, les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine sont comparés aux valeurs réglementaires ou guide disponibles pour estimer le risque sanitaire.

Les incidences résiduelles sont enfin appréciées par rapport au niveau de risque sanitaire ainsi estimé.

La méthodologie détaillée est présentée au chapitre 8.2 du présent volume. Sont détaillées dans les chapitres suivants les étapes de calcul des expositions humaines et d'analyse des risques et des incidences résiduelles pour la santé humaine des émissions chimiques.

Enfin, compte tenu des mesures d'évitement et de réduction mises en place sur le poste de transformation 400/90 kV et les refroidisseurs du centre de stockage Cigéo, le projet n'est pas source d'émissions de légionelles dans l'air.

3.2.3.1 Évaluation des émissions de l'installation, voies d'exposition et populations considérées

3.2.3.1.1 Sources d'émissions chimiques atmosphériques

a) En phase d'aménagements préalables

Pendant la phase d'aménagements préalables, les émissions atmosphériques chimiques sont principalement diffuses. Elles peuvent se produire au niveau de toutes les zones d'interventions potentielles de toutes les opérations. Les flux de ces émissions, en l'absence de phasage précis des travaux, n'ont pu être évalués au niveau du projet global Cigéo. Les mesures d'évitement et de réduction mises en œuvre vis-à-vis de ces émissions ont pour objectif de réduire les quantités émises de substances atmosphériques (poussières, oxydes de carbones, composés organiques volatils et hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.) et de diminuer ainsi l'exposition des populations.

Une fois que les modalités de travaux sur les zones puits et descenderie sont définies dans leurs grands principes, une quantification des poussières et COV pourra être réalisée pour la phase la plus pénalisante d'aménagements préalables, en tenant compte des étapes de travaux, des nombres et des types d'engins, des cadences. Ces éléments seront affinés et successivement présentés dans les différents dossiers.

b) En phase de construction initiale

Les sources du projet global Cigéo recensées pour les émissions dans l'air concernent :

- des sources canalisées liées au fonctionnement des centrales à béton et mortier, à l'aération de certains bâtiments (ateliers mécaniques), aux creusements dans les zones descenderies et puits. Les composés chimiques émis par ces sources sont : les poussières, les oxydes de carbone, les oxydes de soufre, le monoxyde de carbone, et les composés organiques volatils. Les sources liées aux chaudières biomasse en phase de construction initiale n'ont pas été retenues car elles ne fonctionnent que temporairement pendant les périodes les plus froides, pour maintenir une température compatible avec le fonctionnement des centrales à béton ;
- des sources surfaciques représentées par les zones de chantier qui ont pour origine :
  - ✓ les engins nécessaires à la construction des ouvrages. Ils sont sources d'émissions de particules, composés organiques volatils et polluants de type oxydes d'azote provenant des pots d'échappement mais aussi de poussières mises en suspension dans l'air sous l'action de roulage. Les engins circulent majoritairement sur de la roche calcaire, des voiries asphaltées ou des plateformes imperméabilisées, pas ou peu émettrices de poussières. Les émissions de poussières issues du roulage des engins sur les sols argileux ont été considérées comme négligeables sur les zones puits et descenderies en dehors de la zone de stockage des verses (vitesse réduite et déplacements très limités). Par conséquent, les émissions issues du roulage des engins (hors verses) n'ont pas été retenues dans la modélisation de dispersion atmosphérique contrairement aux émissions de poussières liées au roulage des engins sur les verses qui sont plus importantes ;les matériaux stockés sous forme de tas. L'action du vent sur ces stocks met en suspension dans l'air des poussières. Plusieurs stocks sont localisés en zones puits et descenderie. La zone de stockage des verses représente la surface de stockage la plus importante.
- des sources linéiques liées à la circulation des véhicules sur le centre de stockage Cigéo (zone descenderie, zone puits, et liaison intersites) et en dehors du centre en lien avec l'augmentation du trafic accompagnant le projet global Cigéo. Les véhicules légers et les poids lourds sont des sources d'émission de poussières, composés organiques volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques et polluants de type oxydes d'azote provenant des pots d'échappement. Les poussières peuvent aussi être mises en suspension lors du passage des véhicules.

Les flux d'émissions associés à l'ITE et la voie ferroviaire 027000 correspondent au maximum à huit passages de train par jour et peuvent être jugés négligeables au regard des autres sources d'émission du projet global Cigéo.

Des gaz produits lors des tirs d'explosifs pourront contenir des polluants conventionnels type (CO, NOx, SOx, NH_3) selon la nature de l'explosif sélectionné (émulsion ou traditionnel). L'explosif sera utilisé de manière ponctuelle pour le creusement des puits et pour l'amorce de la descenderie intermédiaire pour la partie hors de la couche du Callovo-Oxfordien en creusement. Cette source d'émission de gaz étant très intermittente et marginale par rapport aux autres émissions, elle n'a pas été retenue pour l'évaluation des expositions.

Les poussières émises par les travaux de creusement et le stockage des verses sont susceptibles de contenir des constituants minéralogiques, dont des métaux, L'évaluation de l'incidence sur la santé des poussières a été réalisée dans ce volume. Une analyse plus spécifique des constituants des poussières émis par les verses est présentée en annexe 1 du présent volume. Cette évaluation montre que les constituants minéralogiques des poussières provenant des verses ne constituent pas un danger pour la santé humaine au regard des quantités émises. L'évaluation des risques chimiques effectuée pour les poussières (PM2,5 et PM10) est donc suffisante pour gérer les risques liés à la dispersion atmosphérique des constituants minéralogiques contenus dans les verses.

En dehors des verses, il n'a pas été identifié de sources d'émissions de métaux tels que le nickel, le plomb, le cadmium ou l'arsenic. En effet :

- le plomb (Pb), était principalement émis par le trafic automobile jusqu'à l'interdiction de l'essence plombée (1er janvier 2000). Les autres sources de plomb sont issues de la première et de la seconde fusion du plomb, la fabrication de batteries électriques, la fabrication de certains verres (cristal), etc. Ces activités ne sont pas présentes sur le projet global Cigéo ;
- le nickel (Ni) est émis essentiellement par la combustion du fioul lourd qui contient des traces de ce métal mais aussi par les aciéries électriques. Ces activités ne sont pas présentes sur le projet global Cigéo ;
- les émissions anthropiques de cadmium (Cd) sont induites par la production de zinc et l'incinération de déchets essentiellement. Ces activités ne sont pas présentes sur le projet global Cigéo ;
- les émissions anthropiques de l'arsenic (As) sont induites, d'une part, par les traces de ce métal dans les combustibles minéraux solides ainsi que dans le fioul lourd et, d'autre part, par certaines matières premières utilisées notamment dans des procédés comme la production de verre, la métallurgie des métaux ferreux et non ferreux. Ces activités ne sont pas présentes sur le projet global Cigéo.

Ainsi, en dehors des poussières émises par les travaux de creusement susceptibles de contenir des constituants minéralogiques (verses), aucune activité émettrice de métaux n'a été identifiée sur le projet global Cigéo, il n'a pas été réalisé de modélisation et d'analyse de ces polluants.

Les polluants associés à chaque source et pour la phase de construction initiale (CI) sont détaillés dans le chapitre 2.4.1.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

c) En phase de fonctionnement

Les sources du projet global Cigéo recensées pour les émissions dans l'air concernent :

- des sources canalisées liées au fonctionnement des chaudières (gaz ou biomasse) et des centrales à béton, à l'aération de certains bâtiments (dont l'atelier de maintenance) et des puits pour l'air vicié travaux (VVT). Les composés chimiques émis par ces sources sont : les poussières, les oxydes de carbone, les oxydes de soufre, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures, les dioxines et furanes (pour les chaudières biomasse).
- des sources surfaciques représentées par les zones de chantier qui ont pour origine :
  - ✓ les engins nécessaires à la création et au remaniement des verses. Ils sont sources d'émissions de particules, composés organiques volatils et polluants de type oxydes d'azote provenant des pots d'échappement mais aussi de poussières mises en suspension dans l'air sous l'action de roulage ;
  - ✓ les matériaux stockés sous forme de tas. L'action du vent sur ces stocks met en suspension dans l'air des poussières. Plusieurs stocks sont principalement localisés en zones puits. La zone de stockage des verses représente la surface de stockage la plus importante.
- des sources linéiques liées à la circulation des véhicules sur le centre de stockage Cigéo (zone descenderie, zone puits, et liaison intersites) et en dehors du centre en lien avec l'augmentation du trafic accompagnant le projet global Cigéo. Les véhicules légers et les poids lourds sont des sources d'émission de poussières, composés organiques volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques et polluants de type oxydes d'azote provenant des pots d'échappement. Les poussières peuvent aussi être mises en suspension lors du passage des véhicules.

Concernant les métaux, les raisons détaillées pour la phase de construction initiale permettent également de ne pas prendre en compte ces polluants dans les évaluations.

Les colis de déchets radioactifs n'émettent pas de substances toxiques chimiques considérées comme dangereuses pour la santé humaine, car celles-ci restent à l'intérieur du colis compte tenu des spécifications des colis de déchets.

Les flux d'émissions associés à l'ITE et la voie ferroviaire 027000 correspondent au maximum à huit passages de train par jour et peuvent être jugés négligeables au regard des autres sources d'émission du projet global Cigéo.

Les polluants associés à chaque source pour la phase de fonctionnement (F) sont détaillés dans le chapitre 2.4.1.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

3.2.3.1.2 Bilan des flux d'émissions

Les tableaux suivants présentent le bilan des flux d'émissions du projet global Cigéo pour les phases de construction initiale et de fonctionnement. Ils comprennent les émissions de la zone descenderie, de la zone puits, de la liaison intersites et les émissions sur le réseau routier principal emprunté par les véhicules liés au projet global Cigéo.

Tableau 3-13 Bilan des flux d'émissions chimiques atmosphériques en phase de construction initiale (en tonnes/an)

	Émissions en tonnes/an	NOx	PM10	PM2.5	CO	SO_2	Benzène	COV	BaP
Zone descenderie	Sources ponctuelles	36,93	48,16	48,16	88,48	5,91	24,91	24,91	0,00
	Sources linéiques (circulation véhicules)	2,51	48,79	11,85	9,84	0,00	0,04	0,89	0,00
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	15,70	12,28	5,15	68,96	0,00	0,17	3,48	0,00
	Sous-total	***55,15***	***109,23***	***65,16***	***167,27***	***5,91***	***25,13***	***29,29***	0,00
Zone puits	Sources ponctuelles	30,57	25,91	25,91	95,66	0,00	7,18	7,18	0,00
	Sources linéiques (circulation véhicules)	1,72	32,07	7,79	6,48	0,00	0,03	0,56	0,00
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	15,04	93,34	14,70	65,92	0,00	0,17	3,48	0,00
	Sous-total	***47,34***	***151,32***	***48,40***	***168,06***	***0,00***	***7,39***	***11,23***	0,00
Liaison intersites	Sources linéiques (circulation véhicules)	0,47	4,89	1,21	0,24	0	9,69E-05	0,01	8,60E-07
	Sous-total	***0,47***	***4,89***	***1,21***	***0,24***	***0***	***9,69E-05***	***0,01***	***8,60E-07***
Trafic extérieur (hors LIS)	Sources linéiques (circulation de véhicules)	3,29	10,26	2,63	2,03	0	1,40E-03	0,05	1,25E-05
	Sous-total	*3,29*	*10,26*	*2,63*	*2,03*	*0*	*1,40E-03*	*0,05*	1,25E-05
Total		**106.25**	**275,71**	**117,40**	**337,60**	**5,91**	**32,52**	**40,57**	**1,34E-05**

Tableau 3-14 Bilan des émissions chimiques atmosphériques en phase de fonctionnement (en tonnes/an)

	Émissions en tonnes/an	NOx	PM10	PM2.5	CO	SO_2	Benzène	COV	BaP	Dioxines et furanes
Zone descenderie	Sources ponctuelles	9,80	0,93	0,75	4,97	3,75	0,23	0,93	0,00	1,87E-09
	Sources linéiques (circulation véhicules)	0,49	9,44	2,29	1,91	0	0,01	0,17	0,00	0
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Sous-total	***10,29***	***10,38***	***3,04***	***6,88***	***3,75***	***0,24***	***1,10***	0,00	***1,87E-09***
Zone puits	Sources ponctuelles	23,53	48,89	48,77	40,08	5,37	2,80	3,25	0,00	1,20E-09
	Sources linéiques (circulation véhicules)	1,87	37,36	9,08	7,52	0	0,04	0,70	0,00	0
	Sources surfaciques (engins, envols de poussières)	1,48	29,31	5,54	6,45	0	0,02	0,35	0,00	0
	Sous-total	***26,87***	***115,56***	***63,39***	***54,06***	***5,37***	***2,85***	***4,30***	0,00	***1,20E-09***
Liaison intersites	Sources linéiques (circulation véhicules)	0,27	6,15	1,51	0,29	0	1,14E-04	0,03	8,92E-07	0
	Sous-total	***0,27***	***6,15***	***1,51***	***0,29***	***0***	***1,14E-04***	***0,03***	***8,92E-07***	***0***
Trafic extérieur (hors LIS)	Sources linéiques (circulation de véhicules)	0,43	5,15	1,29	0,67	0	2,80E-04	0,03	2,88E-06	0
	Sous-total	***0,43***	***5,15***	***1,29***	***0,67***	***0***	***2,80E-04***	***0,03***	2,88E-06	***0***
Total		**37,86**	**137,25**	**69.24**	**61,89**	**9,12**	**3,09**	**5,45**	**3,77E-06**	**3,07E-09**

3.2.3.1.3 Voies d'exposition considérées et populations exposées

a) Voies d'exposition

Deux voies d'exposition sont à considérer :

- l'inhalation, qui prend en compte tous les éléments qui pénètrent dans l'organisme par contact avec les voies respiratoires ;
- l'ingestion qui prend en compte tous les éléments qui pénètrent dans l'organisme par contact avec les voies digestives.

Au regard des émissions et des propriétés des composés chimiques émis dans l'atmosphère par le projet global Cigéo, les voies d'exposition évaluées sont :

- l'inhalation pour monoxyde de carbone, oxydes d'azote, oxydes de soufre et composés organiques volatils et les particules (PM2,5 et PM10) ;
- l'ingestion pour les dioxines et furanes, et le benzo(a)pyrène.

b) Population exposée

Les populations à proximité de la ligne ferroviaire et de l'installation terminale embranchée sont éloignées du centre de stockage Cigéo et sont beaucoup moins exposées aux émissions chimiques atmosphériques. En conséquence, les populations considérées pour l'exposition sont :

- les habitants des six communes jouxtant les zones puits et descenderie, à savoir ceux de : Bonnet, Bure, Gillaumé, Mandres-en-Barrois, Ribeaucourt, et Saudron ;
- les travailleurs et le public dans les entreprises et les établissements recevant du public les plus proches du centre de stockage Cigéo ; l'hôtel-restaurant du Bindeuil est considéré représentatif de ce type d'établissement ;
- le public des établissements recevant public dans l'aire d'étude rapprochée du projet global Cigéo : l'école d'Échenay et l'école d'Houdelaincourt. Les autres établissements publics (mairies, restaurants) sont déjà pris en compte dans les autres populations citées ci-avant.

Au vu des éléments précédents, le schéma conceptuel suivant synthétise les voies de transfert et d'exposition retenues pour l'évaluation des risques chimiques atmosphériques sur la santé humaine.

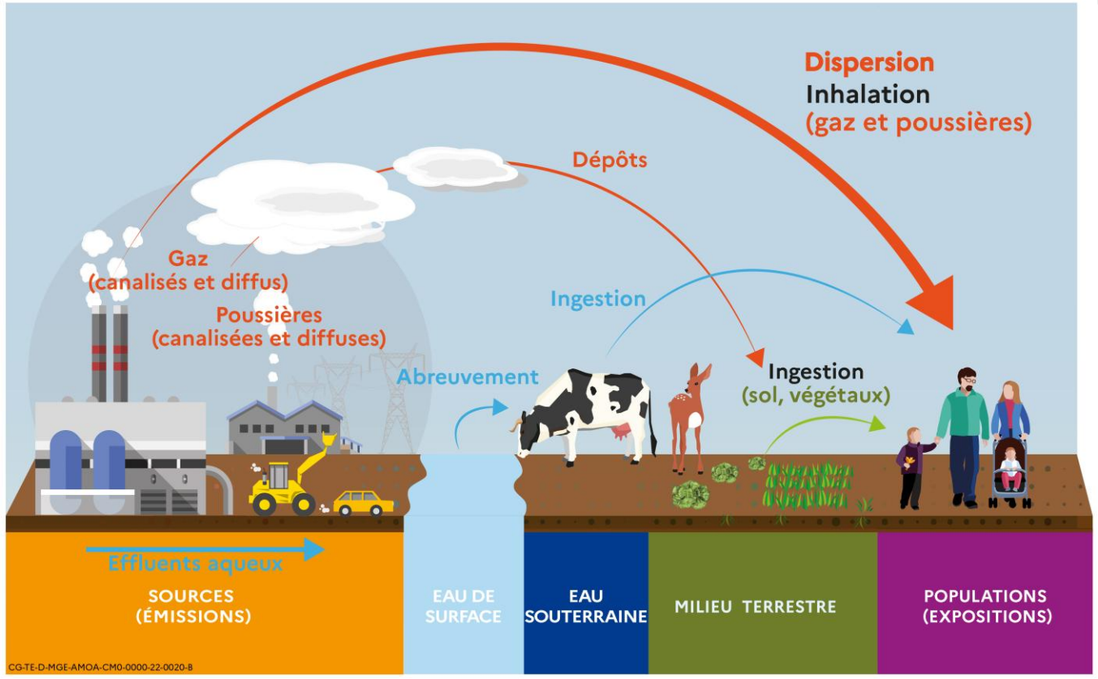


Figure 3-6 *Schématisation des voies d'exposition des populations aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo*

3.2.3.2 Identification des dangers et des relations dose-réponse

3.2.3.2.1 Choix des traceurs de risque et identification des dangers

a) Choix des traceurs de risque

L'étude des incidences liées aux émissions de composés chimiques dangereux sur la santé humaine s'appuie sur les caractéristiques des émissions et de la connaissance de leur toxicité pour sélectionner des substances d'intérêt. Vis-à-vis de la santé humaine, ces substances d'intérêts sont les traceurs de risque (20).

Les traceurs de risque sont les substances émises susceptibles de générer des effets sanitaires chez les personnes qui y sont exposées. Ils sont choisis sur la base de l'existence de valeurs toxicologiques de références (VTR), ou à défaut sur la base de valeurs réglementaires ou de gestion.

La liste des composés chimiques considérés pour les émissions atmosphériques du projet global Cigéo s'appuie sur les caractéristiques des émissions des activités, engins ou les dispositions réglementaires pour certaines installations. Il s'agit des particules (PM10 et PM2,5), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures dont le benzo(a)pyrène et le benzène et les dioxines et furanes. Les dioxines et furanes émis par les chaudières biomasse sont retenus uniquement pour la phase de fonctionnement. Les particules PM10 et PM2,5, le dioxyde de soufre possèdent une valeur toxicologique de référence ou à défaut une valeur réglementaire ou de gestion et en conséquence sont retenus comme traceurs de risque Le monoxyde de carbone possède une VTR et est retenu comme traceur de risque.

Les hydrocarbures émis sont pour l'essentiel des composés organiques volatils qui ont pour origine la combustion associée soit au fonctionnement des engins (à la surface ou en souterrain), des chaudières ou à la circulation des véhicules et des poids lourds. En effet, les composés organiques volatils (COV) sont les hydrocarbures imbrûlés lors de la combustion du carburant. Pour les COV, le benzène, qui fait partie de la famille des COV les plus toxiques, est retenu comme traceur de risque.

D'un point de vue quantitatif, l'hypothèse de proportion de benzène retenue est égale à 5 % de la quantité d'hydrocarbures consommée par le fonctionnement des engins, véhicules et poids lourds. Ce choix est majorant par rapport à la réglementation en vigueur qui stipule depuis le 1er janvier 2000 que la teneur en benzène dans les carburants ne doit pas dépasser 1 %. Un taux de 5 % donne une marge de sécurité pour tenir compte des incertitudes quant à la quantité de benzène effectivement présente dans le carburant et dans les rejets après combustion.

À partir des facteurs d'émission édictés par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (US-EPA), en ce qui concerne les chaudières qui sont sources d'émissions de composés organiques volatils, les proportions de benzène de 1 % et 25 % ont été respectivement retenues pour les chaudières à gaz et biomasse. Pour les autres sources, en l'absence d'information sur la proportion de benzène présente, la totalité des COV et des hydrocarbures a été assimilée au benzène.

Le benzo(a)pyrène dont la source est le trafic routier possède une valeur toxicologique de référence et est retenu comme traceur de risque.

Les oxydes d'azote regroupent essentiellement le monoxyde d'azote et le dioxyde d'azote. Le dioxyde d'azote, plus toxique que le monoxyde d'azote, est retenu comme traceur de risque. Les dioxines (polychlorodibenzodioxines - PCDD) et les furanes (polychlorodibenzofuranes - PCDF) sont émis par les procédés industriels faisant intervenir la combustion incomplète de dérivés aromatiques chlorés ou impliquant la synthèse de dérivés chlorés : incinération, fonderie, métallurgie. La combustion de bois pour le chauffage résidentiel est également à l'origine d'émission de dioxines. Les dioxines et furanes possèdent une valeur toxicologique de référence par ingestion égale à 2.10^{-9} mg/kg/j. Au regard des très faibles flux d'émissions prévus à 3 mg/an pour les deux chaudières biomasse et des dépôts estimés au sol de l'ordre 10^{-13} mg/m²/j, les composés chimiques dioxines et furanes n'ont pas été retenus comme traceur de risque dans la démarche d'évaluation quantitative des risques sanitaires.

Les traceurs de risque retenus pour l'évaluation des risques associés aux émissions chimiques atmosphériques du projet global pour la santé humaine sont récapitulés dans le tableau 3-15 ci-dessous.

Tableau 3-15 Liste des substances d'intérêt des émissions atmosphériques du projet global Cigéo

Composés chimiques	Substances d'intérêt
Poussières (PM2,5 et PM10)*	Les poussières ont été assimilées soit à des **particules fines de 2,5 µm soit à des particules fines 10 µm de diamètre*** (PM10) suivant les clés de répartition lorsqu'elles existent qui sont des traceurs de la pollution de l'air.
Monoxyde de carbone	Le **monoxyde de carbone** (CO) est un traceur de risque
Oxydes d'azote	Ils sont connus pour leurs effets sur la santé et aussi traceurs de la pollution atmosphérique, les oxydes d'azote ont été assimilés du **dioxyde d'azote (NO_2)** retenu comme traceur de risque
Dioxyde de soufre	Le **dioxyde de soufre** (SO_2) est un traceur de risque
Les hydrocarbures et composés organiques volatils (COV)	Les hydrocarbures, essentiellement les COV, sont assimilés à la quantité de **benzène** contenue dans les émissions, compte tenu de sa forte toxicité. Le benzène est retenu comme traceur de risque des COV.
Benzo(a)pyrène	Le benzo(a)pyrène (BaP) est retenu comme traceur de risque.

** L'assimilation de toutes les poussières aux PM2,5 ou aux PM10 est un choix majorant en l'absence de données sur la caractérisation des poussières.*

b) Identification des dangers

L'identification des dangers consiste à identifier les effets indésirables qu'une substance est intrinsèquement capable de provoquer chez l'homme. Ces effets peuvent être de différents types :

- non cancérigène : une substance à effet non cancérigène agit proportionnellement à la dose reçue. Ses effets sont généralement réversibles et une diminution de sa concentration dans l'organisme entraîne la disparition des symptômes. Le mode d'action est essentiellement à seuil ;
- cancérigène : à l'inverse, une substance à effet cancérigène est susceptible d'entraîner des tumeurs malignes dégénérant en cancer dès l'absorption par l'organisme d'une molécule de cette substance (effets sans seuil). Les effets cancérigènes ne sont pas réversibles (sans médication) et les risques s'expriment en probabilité de survenue d'un cancer. Le mode d'action est essentiellement sans seuil.

Le tableau suivant présente les substances émises en phases de construction initiale et de fonctionnement. Il précise les différents types de dangers pour chaque substance par inhalation quand ils existent.

Tableau 3-16 Types de dangers (aiguës ou chroniques) associés aux traceurs de risques retenus

Substances	N° CAS (*chemical abstract service*)	Type de danger par inhalation	Justification
PM2.5		Aigu Chronique avec seuil	
PM10		Aigu Chronique avec seuil	Attention : uniquement valeurs guides disponibles
Monoxyde de carbone	630-08-0	Aigu	
Dioxyde d'azote	10102-44-0	Aigu Chronique avec seuil	Attention : uniquement valeurs guides disponibles
Dioxyde de soufre	7446-09-05	Aigu	Attention : uniquement valeurs guides disponibles
Benzène	71-43-2	Aigu Chronique sans seuil/avec seuil	
Benzo(a)pyrène	50-32-8	Chronique sans seuil/avec seuil	

3.2.3.2.2 Choix des relations dose-réponse

L'évaluation des risques sanitaires, selon la méthodologie recommandée par l'Ineris (20), est réalisée à l'aide des valeurs toxicologiques de référence (VTR), qui expriment la relation dose-réponse.

» LA RELATION DOSE-RÉPONSE

La relation dose-réponse est une relation quantitative entre la dose en composé chimique toxique administrée et l'incidence de l'effet indésirable.

L'appellation VTR regroupe toutes les relations quantitatives entre une dose et l'apparition d'un effet lié à une exposition aiguë ou à une exposition chronique continue ou répétée dans le temps (effets à seuil), ou entre une dose et une probabilité d'effet (effets sans seuil).

» EXPOSITION AIGUË/EXPOSITION CHRONIQUE

Exposition aiguë : exposition de quelques secondes à quelques jours

Exposition chronique : exposition de quelques années à la vie entière

» TYPES DE VALEURS TOXICOLOGIQUES DE RÉFÉRENCE (VTR)

Pour les effets à seuil, une valeur toxicologique de référence (VTR) désigne la dose ou la concentration en-deçà de laquelle la survenue d'un effet n'est pas attendue. Elle s'exprime dans la même unité que l'exposition (mg/m^3 pour l'inhalation).

Pour les effets sans seuil, une valeur toxicologique de référence (VTR) désigne la probabilité supplémentaire de survenue d'un effet pour une unité d'exposition. Elle est aussi appelée excès de risque unitaire (ERU) et s'exprime dans l'unité inverse de l'exposition ($[mg/m^3]^{-1}$ pour l'inhalation).

Les émissions chimiques qui persistent pendant toute la phase de construction initiale ou de fonctionnement conduisent à des expositions prolongées aux composés chimiques. Les valeurs correspondantes à une toxicité chronique ont été préférentiellement recherchées pour chaque substance d'intérêt.

L'existence d'une valeur toxicologique de référence, d'une valeur réglementaire ou de gestion (valeur qui va au-delà des aspects scientifiques), et leur potentiel cancérigène pour chaque substance d'intérêt retenue est identifiée dans le tableau 3-17 ci-après.

Tableau 3-17 Existence de valeur toxicologique de référence, de valeur réglementaire ou de gestion, et leur potentiel cancérigène, pour les substances d'intérêts du projet global Cigéo

Substances d'intérêt	VTR	Valeur réglementaire ou de gestion	Cancérigène
Dioxyde d'azote	Non	Oui	Non
Dioxyde de soufre	Non	Oui	Non
Monoxyde de carbone	Oui*	Oui*	Non
PM2,5	Oui	Oui	Oui
PM10	Non	Oui	Oui
Benzène	Oui	Oui	Oui
Benzo(a)pyrène	Oui	Oui	Oui

*L'objectif de qualité de l'air de l'OMS pour le monoxyde de carbone est retenu comme VTR. Les valeurs toxicologiques de référence disponibles sont présentées dans le tableau 3-18 ci-dessous.

Tableau 3-18 Valeurs toxicologiques de référence pour des expositions par inhalation

Composés	VTR	Durée d'exposition	Source	Effet critique/organe cible	Type de VTR
PM2,5	$1{,}28 \times 10^{-2}$ $(\mu g/m^3)^{-1}$	Année	Anses 2023	Décès toutes causes non accidentelles	Effets sans seuil
Monoxyde de carbone	4 000 $\mu g/m^3$	Journée	OMS 2021	Taux de CO sanguin HbCO, associé à la survenue de l'aggravation des crises d'angor	Effets à seuil
Benzène	10 $\mu g/m^3$	Année	Anses 2018	Diminution du nombre de lymphocytes	Effets à seuil
	$2{,}6 \times 10^{-5}$ $(\mu g/m^3)^{-1}$	Année	Anses, 2013	Leucémies aiguës	Effets sans seuil
Benzo(a)pyrène	2×10^{-3} $\mu g/m^3$	Année	US EPA, 2017 Santé Canada 2021	Effets sur le développement	Effets à seuil
	6×10^{-4} $(\mu g/m^3)^{-1}$	Année	US EPA 2017	Tumeurs des voies aériennes supérieures et du pharynx	Effets sans seuil

Aucune valeur toxicologique de référence n'a été identifiée pour le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et les PM10.

Pour ces substances d'intérêt, les objectifs de qualité de l'air de l'OMS exprimés en moyennes annuelles ont été retenus pour le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et les PM10 (cf. Tableau 3-19).

Tableau 3-19 *Valeurs de référence pour le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et les PM10 pour l'évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo (en gras)*

Substances d'intérêt	Moyenne annuelle (µg.m^{-3})	Moyenne journalière (µg.m^{-3})
	Objectif de qualité de l'air de l'OMS retenu dans l'évaluation	Objectif de qualité de l'air de l'OMS (à ne pas dépasser 3 à 4 jours par an)
Dioxyde d'azote	**10**	25
Dioxyde de soufre	**50**	40
PM10	**15**	45
PM2,5*	**5**	15

*les valeurs de PM2,5 présentées dans le tableau ne sont utilisées en première approche pour l'évaluation quantitative des risques.

3.2.3.3 Analyse des expositions chimiques atmosphériques

3.2.3.3.1 Estimation des concentrations dans l'air

Les concentrations dans l'air des composés chimiques émis sont les résultats de la dispersion atmosphérique des composés émis dans l'atmosphère par le projet global Cigéo. Les conditions de dispersion atmosphérique d'une substance dépendent des conditions de rejet (nature du nuage de produit, mode d'émission…), des conditions météorologiques, (vent, température, nébulosité…), et de l'environnement (nature du sol, topographie, présence d'obstacles).

La détermination des concentrations dans l'air s'effectue à l'aide du logiciel AirAdvanced® Map version Standard. Ce logiciel est également l'outil de référence de nombreuses installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Les résultats de calcul sont projetés sur un domaine d'étude 16 km × 16 km centré sur le centre de stockage Cigéo. Ce domaine d'étude permet d'intégrer les points cibles et l'ensemble des impacts associés aux panaches atmosphériques engendrés par les émissions chimiques du projet global Cigéo.

Les concentrations dans l'air sont estimées aux points cibles présentées au chapitre 2 du volume VII de la présente étude d'impact.

a) **Concentrations dans l'air en phase de construction initiale**

Les concentrations aux points cibles pour la phase de construction initiale sont présentées dans le tableau 3-20 ci-après.

Les concentrations aux points cibles estimées pour les populations humaines sont les concentrations moyennes annuelles dans l'air ajoutées pour tous les traceurs de risque à l'exception du monoxyde carbone pour lequel les valeurs retenues sont les concentrations maximales sur une journée au point cible (centile 100).

Tableau 3-20 *Concentrations des émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo aux points cibles - Construction initiale*

	CO*	NOx	SO_2	PM10	PM2.5	COV	Benzène	B(a)P
	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³
Construction initiale - Impact cumulé (ZD + ZP + LIS + trafic routier)								
Bure	30,35	1,34	0,08	2,47	1,25	0,57	0,47	$3,5 \times 10^{-7}$
Bonnet	7,62	0,30	0,01	0,56	0,26	0,10	0,08	$1,1 \times -10^{-7}$
Gillaumé	24,94	0,41	0,03	0,94	0,42	0,19	0,15	$6,4 \times 10^{-8}$
École Houdelaincourt	4,01	0,19	0,00	0,41	0,16	0,05	0,04	$1,4 \times 10^{-7}$
Mandres-en-Barrois	18,60	0,53	0,02	0,94	0,48	0,19	0,15	$2,2 \times 10^{-7}$
Ribeaucourt	9,77	0,33	0,02	0,63	0,28	0,13	0,10	$2,4 \times 10^{-7}$
Saudron	18,37	0,64	0,05	1,53	0,60	0,29	0,22	$2,8 \times 10^{-7}$
Hôtel du Bindeuil	56,15	2,49	0,23	6,77	3,26	1,24	1,04	$5,7 \times 10^{-7}$
École Échenay	12,07	0,25	0,02	0,48	0,23	0,10	0,08	$8,5 \times 10^{-8}$

* Concentration maximale au point cible sur une journée (centile 100)

b) Concentrations dans l'air en phase de fonctionnement

Les concentrations aux points cibles pour la phase de fonctionnement sont présentées dans le tableau 3-20 ci-après.

Les concentrations aux points cibles estimées pour les populations humaines sont les concentrations moyennes annuelles dans l'air ajoutées pour tous les traceurs de risque à l'exception du monoxyde carbone pour lequel les valeurs retenues sont les concentrations maximales sur une journée au point cible (centile 100).

Tableau 3-21 Concentrations des émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo aux points cibles – Fonctionnement

	CO*	NOx	SO_2	PM10	PM2.5	COV	Benzène	B(a)P
	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³
Fonctionnement - Impact cumulé (ZD + ZP + LIS + trafic routier)								
Bure	1,61	0,38	0,1	1,02	0,48	0,05	$1,91 \times 10^{-2}$	$7,70 \times 10^{-8}$
Bonnet	0,59	0,09	0,02	0,32	0,17	0,01	$6,56 \times 10^{-3}$	$3,40 \times 10^{-8}$
Gillaumé	0,99	0,09	0,02	0,28	0,12	0,01	$4,29 \times 10^{-3}$	$1,70 \times 10^{-8}$
École Houdelaincourt	0,29	0,06	0,01	0,23	0,11	0,01	$3,90 \times 10^{-3}$	$3,80 \times 10^{-8}$
Mandres-en-Barrois	1,27	0,14	0,03	0,44	0,2	0,02	$6,43 \times 10^{-3}$	$6,00 \times 10^{-8}$
Ribeaucourt	0,80	0,08	0,02	0,25	0,1	0,01	$3,24 \times 10^{-3}$	$4,30 \times 10^{-8}$
Saudron	0,67	0,19	0,05	0,46	0,21	0,02	$8,88 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-8}$
Hôtel du Bindeuil	1,12	0,78	0,24	1,9	0,6	0,09	$2,16 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-7}$
École Échenay	0,35	0,05	0,01	0,16	0,07	0,01	$2,77 \times 10^{-3}$	$1,40 \times 10^{-8}$

* Concentration maximale au point cible sur une journée (centile 100)

3.2.3.3.2 Description des scénarios d'exposition

Les scénarios d'exposition permettent de tenir compte, dans un premier niveau d'approche, de la diversité constatée au sein des populations des communes les plus exposées aux émissions du projet global Cigéo : lieux de vie, caractéristiques physiologiques (poids corporel, débit respiratoire). Ils sont définis pour répondre *a priori* à des situations d'exposition élevée et représenter un groupe de population et non uniquement quelques individus.

Pour le projet global Cigéo, l'hypothèse majorante d'une exposition de 100 % du temps est retenue au niveau des points cibles. Ainsi, les populations (adultes et enfants) séjournent 24 heures sur 24 heures, sept jours sur sept jours et 365 jours par an sur leur lieu de résidence (habitations et établissements), soit une fréquence d'exposition aux émissions égale à un.

Pour rappel, à partir de l'autorisation de la création de l'installation nucléaire de base, la mise en œuvre du centre de stockage Cigéo se déroule sur deux phases principales avec en premier lieu une phase de construction initiale, suivie d'une phase de fonctionnement de plus de 100 ans avant sa fermeture et démantèlement.

Habituellement, le scénario Habitant « majorant » du guide de l'Ineris (20) est retenu. Dans ce scénario, le nombre d'années d'exposition est fixé à 30 ans pour des expositions continues. De façon pénalisante l'Andra a choisi une exposition plus longue de 70 ans au regard de la durée d'exploitation du centre de stockage Cigéo qui correspond au scénario simple et majorant du guide Ineris.

En conséquence, deux scénarios d'exposition ont été retenus pour caractériser les risques pour les effets cancérogènes en tenant compte des recommandations du guide Ineris :

- scénario 1 : les populations cumulent l'exposition associée à la phase de construction initiale pendant 15 ans et celle associée à la phase de fonctionnement pendant 55 ans ;
- scénario 2 : les populations ont une exposition associée à la phase de fonctionnement pendant 70 ans.

3.2.3.3.3 Estimation des doses d'exposition

Pour la voie inhalation, l'exposition est exprimée par la concentration inhalée calculée à l'aide de la formule suivante :

$$CI = \frac{\sum_i C_i \times t_i}{T}$$

Où :

CI : Concentration moyenne inhalée (en mg/m³) ;

C_i : Concentration de polluant dans l'air inhalé pendant une fraction de temps i (en mg/m³) ;

t_i : Durée d'exposition à la concentration C_i sur la période d'exposition ;

T : Durée de la période d'exposition (même unité que t_i).

Dans les scénarios retenus et présentés dans le chapitre précédent, la fréquence d'exposition est égale à 1 (ti/T). La dose d'exposition pour la population correspond à la concentration du traceur de risque au point cible présenté en début de chapitre.

3.2.3.4 Évaluation quantitative du risque sanitaire lié aux émissions chimiques atmosphériques

Conformément à la méthodologie recommandée par l'Ineris (20), le risque sanitaire est estimé, en évaluant, à l'aide des valeurs toxicologiques de référence (VTR) relatives aux substances étudiées, soit des quotients de danger (QD) dans le cas des substances avec effet de seuil (substances non cancérogènes), soit des excès de risque individuel (ERI) dans le cas des substances sans effet de seuil .

En l'absence de VTR, une évaluation qualitative du risque est réalisée. La concentration moyenne inhalée est comparée aux Valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles.

3.2.3.4.1 Calcul d'indicateurs de risque

a) Polluants à effet de seuil

Pour les polluants à effet à seuil, l'indicateur de risque est le quotient de danger qui est pour la voie inhalation le rapport entre la concentration moyenne inhalée et la valeur toxicologique de référence.

$$QD = \frac{CI}{VTR}$$

Où :

CI : Concentration moyenne inhalée (en mg/m³) ;

VTR : valeur toxicologique de référence pour un effet à seuil.

Si le QD ne dépasse pas la valeur de 1, le risque peut être considéré comme « non préoccupant ».

L'analyse du risque sanitaire pour le monoxyde de carbone, le benzène et le benzo(a)pyrène (qui disposent d'une VTR avec seuil) est restituée dans le tableau 3-22 pour la phase de construction initiale et pour la phase de fonctionnement.

Tableau 3-22 *Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour les traceurs de risque disposant d'une VTR avec seuil*

	QD pour le monoxyde de carbone		QD pour le benzène		QD pour le benzo(a)pyrène	
	Construction initiale	Fonctionnement	Construction initiale	Fonctionnement	Construction initiale	Fonctionnement
Bure	$7{,}59 \times 10^{-3}$	$4{,}02 \times 10^{-4}$	$4{,}67 \times 10^{-2}$	$1{,}91 \times 10^{-3}$	$1{,}75 \times 10^{-4}$	$3{,}87 \times 10^{-5}$
Bonnet	$1{,}91 \times 10^{-3}$	$1{,}49 \times 10^{-4}$	$7{,}59 \times 10^{-3}$	$6{,}56 \times 10^{-4}$	$5{,}50 \times 10^{-5}$	$1{,}69 \times 10^{-5}$
Gillaumé	$6{,}23 \times 10^{-3}$	$2{,}47 \times 10^{-4}$	$1{,}51 \times 10^{-2}$	$4{,}29 \times 10^{-4}$	$3{,}20 \times 10^{-5}$	$8{,}29 \times 10^{-6}$
École Houdelaincourt	1×10^{-3}	$7{,}35 \times 10^{-5}$	$3{,}90 \times 10^{-3}$	$3{,}90 \times 10^{-4}$	$7{,}00 \times 10^{-5}$	$1{,}90 \times 10^{-5}$
Mandres-en-Barrois	$4{,}65 \times 10^{-3}$	$3{,}19 \times 10^{-4}$	$1{,}54 \times 10^{-2}$	$6{,}43 \times 10^{-4}$	$1{,}10 \times 10^{-4}$	$3{,}02 \times 10^{-5}$
Ribeaucourt	$2{,}44 \times 10^{-3}$	$2{,}01 \times 10^{-4}$	$1{,}01 \times 10^{-2}$	$3{,}24 \times 10^{-4}$	$1{,}20 \times 10^{-4}$	$2{,}15 \times 10^{-5}$
Saudron	$4{,}59 \times 10^{-3}$	$1{,}68 \times 10^{-4}$	$2{,}16 \times 10^{-2}$	$8{,}88 \times 10^{-4}$	$1{,}40 \times 10^{-4}$	$2{,}50 \times 10^{-5}$
Hôtel du Bindeuil	$1{,}40 \times 10^{-2}$	$2{,}81 \times 10^{-4}$	$1{,}04 \times 10^{-1}$	$2{,}16 \times 10^{-3}$	$2{,}85 \times 10^{-4}$	$7{,}49 \times 10^{-5}$
École Échenay	$3{,}02 \times 10^{-3}$	$8{,}64 \times 10^{-5}$	$8{,}33 \times 10^{-3}$	$2{,}77 \times 10^{-4}$	$4{,}25 \times 10^{-5}$	$6{,}83 \times 10^{-6}$

Les quotients de danger calculés sont tous largement inférieurs à la valeur repère de 1. L'incidence sur la santé humaine est très faible.

Nota Bene : le QD pour le CO a été ajouté en cohérence avec l'instruction de la DAC par l'ASNR.

b) Polluants à effets sans seuil

Pour les polluants à effet sans seuil, l'indicateur de risque est l'excès de risque individuel (ERI). Pour l'inhalation il est calculé à partir de la concentration (CI), le temps d'exposition (Ti) et la durée de vie comme suit :

$$\mathrm{ERI} = \frac{\sum_i \mathrm{CI} \times \mathrm{Ti}}{\mathrm{Tm}} \times \mathrm{ERU}$$

Pour les composés cancérigènes, l'exposition est rapportée à la durée de vie, conventionnellement 70 ans. Compte tenu des scénarios retenus Ti = 70 ans (cf. Chapitre 3.2.3.3.2 du présent volume).

Si l'ERI ne dépasse pas 10^{-5}, le risque peut être considéré comme « non préoccupant ».

Les PM2,5, le benzène et le benzo(a)pyrène sont les seuls traceurs de risque disposant d'une VTR sans seuil. Les VTRs de ces trois traceurs sont respectivement $1{,}28.10^{-2}$ $(\mu g.m^{-3})^{-1}$, $2{,}6.\ 10^{-5}$ $(\mu g/m^3)^{-1}$ et 6.10^{-4} $(\mu g/m^3)^{-1}$. Les analyses de risque associées à ces trois traceurs de risque sont restituées dans le tableau 3-23 et le tableau 3-24 pour les deux scénarios d'exposition présentés dans le chapitre 3.2.3.3.2. Pour rappel, le scénario d'exposition 1 cumule l'exposition de la phase de construction pendant 15 ans et celle de la phase de fonctionnement pendant 55 ans ; le scénario d'exposition 2 correspond à une exposition de 70 années pendant la phase de fonctionnement.

Tableau 3-23 *Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour le benzène concerné par les effets sans seuil*

	ERI du benzène			
	Construction initiale (15 ans)	Fonctionnement (55 ans)	Scénario 1	Scénario 2
Bure	$2{,}60 \times 10^{-6}$	$3{,}91 \times 10^{-7}$	$2{,}99 \times 10^{-6}$	$4{,}98 \times 10^{-7}$
Bonnet	$4{,}23 \times 10^{-7}$	$1{,}34 \times 10^{-7}$	$5{,}57 \times 10^{-7}$	$1{,}71 \times 10^{-7}$
Gillaumé	$8{,}42 \times 10^{-7}$	$8{,}77 \times 10^{-8}$	$9{,}30 \times 10^{-7}$	$1{,}12 \times 10^{-7}$
École Houdelaincourt	$2{,}17 \times 10^{-7}$	$7{,}97 \times 10^{-8}$	$2{,}97 \times 10^{-7}$	$1{,}01 \times 10^{-7}$
Mandres-en-Barrois	$8{,}60 \times 10^{-7}$	$1{,}31 \times 10^{-7}$	$9{,}92 \times 10^{-7}$	$1{,}67 \times 10^{-7}$
Ribeaucourt	$5{,}65 \times 10^{-7}$	$6{,}63 \times 10^{-8}$	$6{,}31 \times 10^{-7}$	$8{,}44 \times 10^{-8}$
Saudron	$1{,}21 \times 10^{-6}$	$1{,}81 \times 10^{-7}$	$1{,}39 \times 10^{-6}$	$2{,}31 \times 10^{-7}$
Hôtel du Bindeuil	$5{,}80 \times 10^{-6}$	$4{,}40 \times 10^{-7}$	$6{,}24 \times 10^{-6}$	$5{,}60 \times 10^{-7}$
École Échenay	$4{,}64 \times 10^{-7}$	$5{,}65 \times 10^{-8}$	$5{,}21 \times 10^{-7}$	$7{,}19 \times 10^{-8}$

Les excès de risque individuels calculés pour le benzène sont tous inférieurs à 10^{-5} sur les lieux d'habitation des populations. Un ERI égale à 10^{-5} correspond à un niveau de risque généralement reconnu comme acceptable. En conséquence, le risque pour les effets sans seuil du benzène peut donc être considéré comme non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine pour les populations.

Tableau 3-24 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour les PM2,5 concernées par les effets sans seuil

	ERI des PM2,5			
	Construction initiale (15 ans)	Fonctionnement (55 ans)	Scénario 1	Scénario 2
Bure	$3{,}42 \times 10^{-3}$	$4{,}85 \times 10^{-3}$	$8{,}27 \times 10^{-3}$	$6{,}17 \times 10^{-3}$
Bonnet	$7{,}17 \times 10^{-4}$	$1{,}68 \times 10^{-3}$	$2{,}40 \times 10^{-3}$	$2{,}14 \times 10^{-3}$
Gillaumé	$1{,}16 \times 10^{-3}$	$1{,}16 \times 10^{-3}$	$2{,}32 \times 10^{-3}$	$1{,}48 \times 10^{-3}$
École Houdelaincourt	$4{,}45 \times 10^{-4}$	$1{,}07 \times 10^{-3}$	$1{,}51 \times 10^{-3}$	$1{,}36 \times 10^{-3}$
Mandres-en-Barrois	$1{,}30 \times 10^{-3}$	$2{,}02 \times 10^{-3}$	$3{,}32 \times 10^{-3}$	$2{,}57 \times 10^{-3}$
Ribeaucourt	$7{,}58 \times 10^{-4}$	$9{,}67 \times 10^{-4}$	$1{,}73 \times 10^{-3}$	$1{,}23 \times 10^{-3}$
Saudron	$1{,}66 \times 10^{-3}$	$2{,}12 \times 10^{-3}$	$3{,}78 \times 10^{-3}$	$2{,}70 \times 10^{-3}$
Hôtel du Bindeuil	$8{,}94 \times 10^{-3}$	$6{,}00 \times 10^{-3}$	$1{,}49 \times 10^{-2}$	$7{,}63 \times 10^{-3}$
École Échenay	$6{,}28 \times 10^{-4}$	$6{,}82 \times 10^{-4}$	$1{,}31 \times 10^{-3}$	$8{,}68 \times 10^{-4}$

Les ERI calculés pour les PM2,5 pour le projet global Cigéo sont de l'ordre de 10^{-3} et 10^{-2}. Contrairement aux autres composés chimiques, l'Anses ne propose aucune valeur de risque repère. L'Anses indique néanmoins que les concentrations les plus faibles observées pour les particules de l'air ambiant en France conduiraient à un niveau de risque de l'ordre de 10^{-3}, qui est du même ordre de grandeur que les indicateurs calculés pour Cigéo (28). Par ailleurs l'exposition à une concentration en PM2,5 équivalente aux valeurs guides et aux valeurs cibles intermédiaires recommandées par l'OMS conduiraient à des excès de risque supérieurs à $5{,}7.10^{-2}$, c'est-à-dire du même ordre de grandeur ou supérieurs aux ERI calculés pour le projet global Cigéo. En tenant compte des recommandations de l'Anses et de l'OMS, le risque calculé pour les effets sans seuil des PM2,5 peut donc aussi être considéré comme non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine des populations (29).

Tableau 3-25 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour le benzo(a)pyrène concerné par les effets sans seuil (sans unité)

	ERI du benzo(a)pyrène			
Point cible	Construction initiale (15 ans)	Fonctionnement (55 ans)	Scénario 1	Scénario 2
Bure	$4{,}50 \times 10^{-11}$	$3{,}65 \times 10^{-11}$	$8{,}15 \times 10^{-11}$	$4{,}64 \times 10^{-11}$
Bonnet	$1{,}41 \times 10^{-11}$	$1{,}59 \times 10^{-11}$	$3{,}01 \times 10^{-11}$	$2{,}03 \times 10^{-11}$
Gillaumé	$8{,}23 \times 10^{-12}$	$7{,}82 \times 10^{-12}$	$1{,}60 \times 10^{-11}$	$9{,}95 \times 10^{-12}$
École Houdelaincourt	$1{,}80 \times 10^{-11}$	$1{,}80 \times 10^{-11}$	$3{,}60 \times 10^{-11}$	$2{,}28 \times 10^{-11}$
Mandres-en-Barrois	$2{,}83 \times 10^{-11}$	$2{,}85 \times 10^{-11}$	$5{,}68 \times 10^{-11}$	$3{,}62 \times 10^{-11}$
Ribeaucourt	$3{,}09 \times 10^{-11}$	$2{,}03 \times 10^{-11}$	$5{,}11 \times 10^{-11}$	$2{,}58 \times 10^{-11}$
Saudron	$3{,}60 \times 10^{-11}$	$2{,}36 \times 10^{-11}$	$5{,}96 \times 10^{-11}$	$3{,}00 \times 10^{-11}$
Hôtel du Bindeuil	$7{,}33 \times 10^{-11}$	$7{,}06 \times 10^{-11}$	$1{,}44 \times 10^{-10}$	$8{,}99 \times 10^{-11}$
École Échenay	$1{,}09 \times 10^{-11}$	$6{,}44 \times 10^{-12}$	$1{,}74 \times 10^{-11}$	$8{,}20 \times 10^{-12}$

Les excès de risque individuels (ERI) calculés pour le benzo(a)pyrène sont tous inférieurs à 10^{-5} sur les lieux d'habitation des populations. Un ERI inférieur ou égale à 10^{-5} correspond à un niveau de risque généralement reconnu comme non préoccupant [10] . En conséquence, le risque pour les effets sans seuil du benzène peut donc être considéré comme non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine pour les populations.

3.2.3.4.2 Caractérisation quantitative globale du risque

a) Effets additifs à seuil

La caractérisation des effets additifs à seuil consiste à additionner les quotients de danger des substances provoquant le même effet sur le même organe, par le même mécanisme biologique (cf. Chapitre 3.2.3.2.2 du présent volume). Ce calcul n'est pas effectué car l'effet critique du monoxyde de carbone, du benzène et du benzo(a)propylène portent sur des organes cibles différents.

b) Effets additifs sans seuil

La caractérisation des effets additifs sans seuil consiste à additionner les ERI. Les calculs des effets additifs sans seuil pour les PM2,5, le benzène et le benzo(a)pyrène sont réalisés et présentés dans le tableau 3-26. La somme des ERI doit être inférieure à 10^{-5}.

Tableau 3-26 Analyse du risque global pour les effets additifs sans seuil (sans unité)

ERI	Scénario 1*	Scénario 2
Bure	$8{,}28 \times 10^{-3}$	$6{,}18 \times 10^{-3}$
Bonnet	$2{,}40 \times 10^{-3}$	$2{,}14 \times 10^{-3}$
Gillaumé	$2{,}32 \times 10^{-3}$	$1{,}48 \times 10^{-3}$
École Houdelaincourt	$1{,}51 \times 10^{-3}$	$1{,}36 \times 10^{-3}$
Mandres-en-Barrois	$3{,}32 \times 10^{-3}$	$2{,}57 \times 10^{-3}$
Ribeaucourt	$1{,}73 \times 10^{-3}$	$1{,}23 \times 10^{-3}$
Saudron	$3{,}78 \times 10^{-3}$	$2{,}70 \times 10^{-3}$
Hôtel du Bindeuil	$1{,}49 \times 10^{-2}$	$7{,}63 \times 10^{-3}$
École Échenay	$1{,}31 \times 10^{-3}$	$8{,}69 \times 10^{-4}$

Pour les effets sans seuil, le risque associé à l'exposition aux PM2,5 est prépondérant car les excès de risque individuels correspondants aux effets additifs des PM2,5, du benzène et du benzo(a)pyrène sont identiques aux excès de risques individuels calculés pour les PM2,5 seules. Ainsi, en tenant des recommandations de l'Anses et de l'OMS, le risque calculé pour les effets additifs sans seuil peut aussi être considéré comme non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine des populations.

3.2.3.4.3 Caractérisation qualitative du risque

Il n'existe pas de valeur toxicologique de référence chronologique pour les PM10, les oxydes d'azote, et les oxydes de soufre.

Les concentrations moyennes annuelles de ces substances au niveau des habitations, des établissements accueillant du public ou des populations sensibles, sont toutes largement inférieures à celles des objectifs de qualité de l'air (cf. Tableau 3-19) et de protection de la santé humaine (cf. Tableau 3-20 et tableau 3-21 du présent volume de l'étude d'impact).

3.2.3.5 Appréciation des incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions chimiques atmosphériques

Aux lieux d'habitation des populations susceptibles d'être les plus exposées, les expositions aux émissions chimiques sont toutes à des niveaux inférieurs aux objectifs de qualité de l'air et aux valeurs limites pour la protection de la santé humaine. Les indicateurs de risque calculé sont inférieurs ou conformes aux valeurs repères de la méthodologie recommandée par l'Ineris ou l'Anses (20, 28).

Les incidences des émissions chimiques du projet global Cigéo sur la santé humaine sont donc très faibles pendant les phases de construction initiale et de phase de fonctionnement.

Les incidences résiduelles des émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

4

Évaluation des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine

4.1	Incidences potentielles	56
4.2	Mesures d'évitement et de réduction	62
4.3	Incidences résiduelles	62

Pour rappel, pendant les phases d'aménagements préalables et de construction initiale, aucun colis de déchets n'est ni acheminé vers le centre de stockage Cigéo, ni présent au sein de ses installations avant la mise en service de l'installation nucléaire de base.

Lorsque le centre de stockage Cigéo sera mis en service, après autorisation de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), il commencera à recevoir et à stocker les colis de déchets radioactifs. Comme présenté dans le volume II de la présente étude d'impact, ces colis de déchets radioactifs sont conditionnés sur les sites des producteurs, c'est-à-dire que les déchets y sont solidifiés et immobilisés sous une forme non dispersable (par vitrification, cimentation…), puis placés dans un conteneur conçu pour en faciliter la manutention, l'entreposage, le transfert et le stockage.

L'acheminement des colis de déchets radioactifs depuis les sites des producteurs est réalisé préférentiellement par le rail (*via* la ligne ferroviaire 027000 et l'installation terminale embranchée). Le transport sur la route est donc autant que possible limité. À leur arrivée sur le site, les colis de déchets ne subissent aucune transformation, notamment ils ne sont pas ouverts. Les activités effectuées au sein des installations impliquant les colis de déchets sont limitées à des opérations de manutention (extraction des emballages de transport, insertion dans des conteneurs ou paniers de stockage, transfert dans des hottes jusqu'aux alvéoles de stockage) et de contrôle à différentes étapes avant leur stockage en alvéole.

L'évaluation des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine du projet global Cigéo est réalisée selon une démarche prudente et enveloppe.

Dans la présente étude d'impact, les incidences liées aux émissions radioactives sur la santé sont évaluées sur la base d'estimations majorantes des émissions radioactives du projet global Cigéo. Elles sont calculées au travers d'un indicateur d'exposition humaine, appelé « dose efficace engagée », tenant compte de la dispersion dans l'environnement de ces émissions, de leur transfert dans l'environnement et dans la chaîne agroalimentaire ainsi que des habitudes de vie et de consommation alimentaire de l'homme.

L'exposition humaine ainsi évaluée est ensuite comparée à des valeurs seuils. Le code de la santé publique (article R. 1333-11) impose pour la population une limite annuelle d'exposition de 1 mSv reçue du fait des activités nucléaires, qui s'ajoute à la radioactivité naturelle et à celle issue des actes médicaux. Pour le centre de stockage Cigéo, selon les recommandations de la commission internationale de protection radiologique, l'Andra retient une fraction de cette valeur (0,25 mSv/an).

4.1 Incidences potentielles

4.1.1 Généralités

Les émissions radioactives sont comme les émissions dites conventionnelles, gazeuses ou particulaires, sauf qu'elles concernent des isotopes d'éléments chimiques qui émettent des rayonnements ionisants.

» RAYONNEMENTS IONISANTS

Dans le noyau instable d'un atome radioactif, il existe un surplus d'énergie qui conduit à une désintégration de l'atome en un autre atome. Pendant cette transformation, l'atome expulse son énergie excédentaire sous la forme de rayonnements invisibles : on parle de rayonnements ionisants.

Il existe trois types de rayonnements ionisants de nature et d'intensité différentes : alpha, bêta et gamma. Leur pouvoir de pénétration dans les tissus vivants diffère d'un rayonnement à l'autre (cf. Figure 4-1). La nocivité de ces radionucléides dépend aussi de l'énergie mise en jeu lors de cette désintégration.

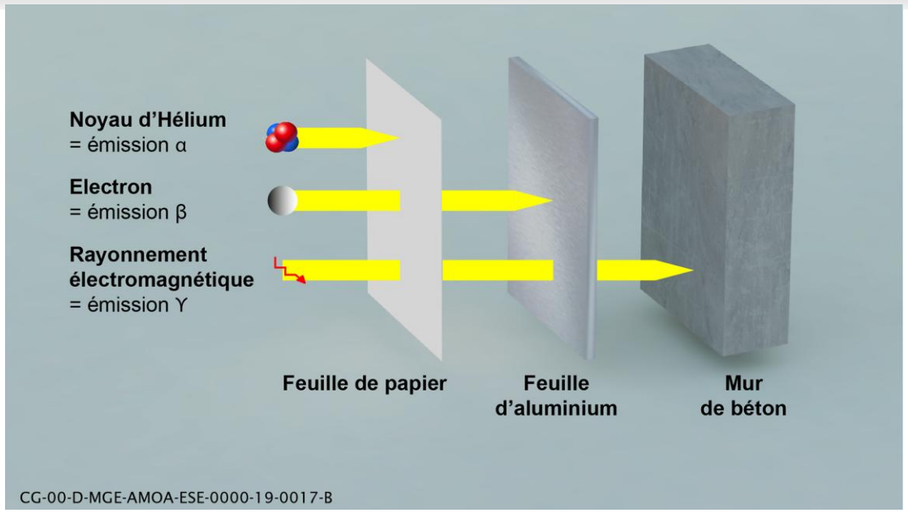


Figure 4-1 Illustration des trois types de rayonnements ionisants

Trois unités sont fréquemment utilisées dans le domaine du nucléaire : le becquerel (Bq), le gray (Gy) et le sievert (Sv). Le becquerel (Bq) mesure l'activité (nombre de désintégrations par seconde) de la matière radioactive. De son côté, le gray (Gy) mesure la dose physiquement « absorbée » par la matière. Elle représente l'énergie absorbée par un kilogramme exposé à un rayonnement ionisant apportant une énergie d'1 joule : 1 Gy = 1 J/kg. Enfin, le sievert (Sv) est l'unité de mesure des doses équivalente et efficace, qui permet d'évaluer l'effet du rayonnement sur la santé des individus.

Ce transfert d'énergie est illustré sur la figure 4-2.

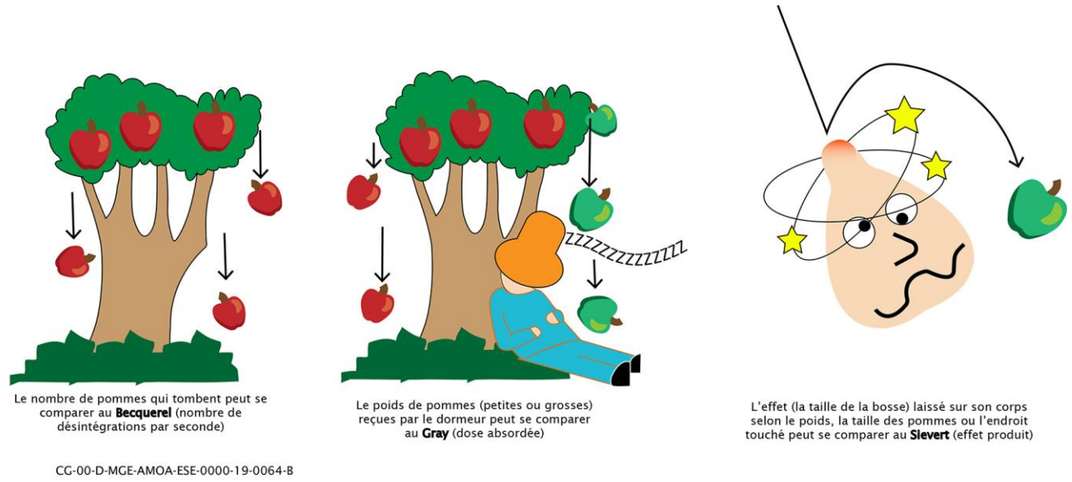


Figure 4-2 Illustration de l'effet de la radioactivité : du becquerel (Bq) au sievert (Sv)

Enfin, il existe deux grands types de sources d'exposition à la radioactivité (cf. Figure 4-3) :

- **l'irradiation ou exposition externe** lorsqu'une personne se trouve exposée à des rayonnements émis par une source radioactive située à l'extérieur du corps. Dans ce cas, l'exposition est réduite, voire cesse, dès lors que la source de radioactivité est éloignée de la personne ou si un écran est interposé entre la personne et la source ;
- **la contamination ou exposition interne** lorsqu'une personne est exposée à des rayonnements émis par des radionucléides qui ont pénétré à l'intérieur de son organisme. Ceci peut se produire par inhalation de substances radioactives présentes dans l'air, par ingestion d'aliments contenant des substances radioactives ou par transfert à travers la peau. Lors d'une contamination, l'exposition aux substances radioactives se poursuit tant que la source est à l'intérieur ou au contact du corps.

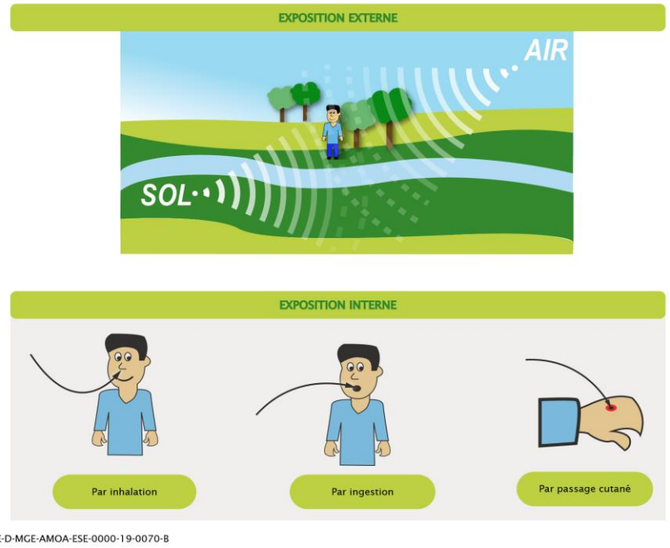


Figure 4-3 Illustration des types d'exposition à la radioactivité

Les effets des rayonnements ionisants sur l'homme sont évalués en tenant compte des différents processus en jeu.

BECQUEREL

Le becquerel (Bq) est l'unité internationale de mesure de la radioactivité.

Le nombre de Becquerel correspond au nombre de désintégrations qui se produisent à chaque seconde au sein d'une certaine masse de matière contenant des radionucléides.

À titre d'exemple, d'après les données de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (30–32) :

- un litre d'eau de pluie présente une activité d'environ 1 Bq (essentiellement dû au tritium) ;
- un litre de lait présente une activité de 80 Bq (essentiellement dû au potassium 40 (^{40}K)) ;
- un kilogramme de pomme de terre présente une activité de 150 Bq (essentiellement dû au ^{40}K) ;
- un kilogramme de sol sédimentaire présente une activité de 400 Bq (dus à l'^{238}U, au ^{232}Th et descendants, et au ^{40}K) ;
- un homme (70 kg) présente une activité de plus de 7 000 Bq (dont ~4 500 Bq dus au ^{40}K des os, le reste est dû au carbone 14 (^{14}C)).

CARBONE 14 DANS LE CORPS HUMAIN

Les organismes vivants contiennent naturellement du carbone 14 (^{14}C) provenant de l'interaction des rayons cosmiques avec le carbone présent dans l'atmosphère. La proportion de ^{14}C, radioactif, par rapport au ^{12}C, stable, présent dans un organisme vivant est constante, égale à $1{,}3 \times 10^{-12}$. Comme tout isotope du carbone, le carbone 14 se combine avec l'oxygène de notre atmosphère pour former alors du CO_2 (dioxyde de carbone). Ce CO_2 est assimilé par les organismes vivants tout au long de leur vie : respiration, alimentation… En mourant, ils n'en assimilent plus. La quantité de carbone 14 assimilé diminue alors au cours du temps de façon exponentielle tandis que celle de carbone 12 reste constante. C'est le principe de la datation au carbone 14.

Le transfert de cette énergie des rayonnements ionisants à la matière vivante est responsable d'effets biologiques sur l'organisme.

EFFETS BIOLOGIQUES SUR LES CELLULES DES TISSUS OU DES ORGANES

Les rayonnements ionisants peuvent affecter les cellules des tissus ou des organes exposés, de sorte que les processus biologiques des cellules sont perturbés (33). Cela peut conduire à :

- la modification des propriétés chimiques des molécules. Les constituants de la cellule ne peuvent plus alors jouer leur rôle ;
- l'altération de l'ADN, qui a un rôle de « chef d'orchestre » dans la vie cellulaire. Ces lésions d'ADN, mal réparées, peuvent, dans certains cas, empêcher la reproduction cellulaire ou entraîner la mort de la cellule. Cette mortalité cellulaire est liée à la nature et à l'intensité des rayonnements : le nombre de cellules tuées est proportionnel à la dose reçue par la matière vivante.

La nature et l'importance des lésions cellulaires, pour une même dose d'exposition, dépendent de plusieurs facteurs. Ces facteurs sont notamment :

- le mode d'exposition (externe ou interne) ;
- la nature des rayonnements (alpha, beta, gamma) ;
- le débit d'énergie reçue (une même énergie reçue en peu de temps est généralement plus nocive que si elle est reçue de manière étalée dans le temps) ;
- l'influence de certains paramètres chimiques ou physiques sur la sensibilité cellulaire (telle que la température par exemple) ;
- le type des cellules exposées : les cellules qui ont un potentiel de multiplication important (dites « souches », telles les cellules de la moelle osseuse) sont notamment plus « radiosensibles ».

Les effets sur l'organisme des rayonnements sont de deux types :

- **les effets à court terme, dits déterministes**, liés directement aux lésions cellulaires et pour lesquels un seuil d'apparition a été défini. Les effets pathologiques apparaissent à partir d'un certain seuil d'exposition. Ils peuvent se manifester de quelques heures à quelques jours après cette exposition. À titre d'exemple, une dose de l'ordre de 5 Sv (soit 5 000 mSv) reçue en un court laps de temps est létale pour une personne sur deux ;
- **les effets à long terme et aléatoires (ou stochastiques),** comme les cancers et anomalies génétiques. Ils peuvent se manifester de quelques mois à quelques années après l'exposition. À titre d'exemple, la surveillance des populations d'Hiroshima confirme une augmentation de risque de cancer à partir d'une dose d'exposition estimée de l'ordre de 100 mSv.

4.1.2 Méthode de calcul de l'exposition aux rayonnements ionisants

Pour estimer un risque lié à une exposition à un élément radioactif, il y a ainsi deux approches possibles :

- l'une relève de l'épidémiologie, qui consiste à étudier une population potentiellement exposée et à regarder les effets de cette exposition sur cette population en comparant les résultats par rapport à une population témoin qui n'est pas exposée. Cette approche permet d'estimer directement un risque.

  Pour être capable de mesurer un tel risque potentiellement faible par rapport à d'autres risques, il est nécessaire de mettre en place des études extrêmement lourdes sur des populations très nombreuses et exposées, ce qui n'est pas toujours possible. Concernant le tritium par exemple, une telle approche est impossible ; les rares études faites aujourd'hui n'apportent pas de réponses, compte tenu du risque qui demeure très faible (le tritium est un radionucléide faiblement radiotoxique) ;
- l'autre approche relève d'une démarche prédictive, qui consiste à estimer, à partir des quantités de radionucléides émis (en Becquerel), les effets sur l'homme (en Sievert). **C'est cette démarche prédictive qui est utilisée pour évaluer l'exposition humaine face aux dangers des rayonnements ionisants**. Le calcul de la dose efficace engagée par une exposition aux émissions radioactives intègre plusieurs effets présentés ci-après et illustrés sur la figure 4-4.

La démarche comprend la détermination de la **dose absorbée** exprimée en Gray (Gy), qui correspond à la quantité d'énergie délivrée par l'élément radioactif émis et transférée à la matière vivante (pour l'homme, à ses organes). Cette dose absorbée est estimée à partir de modèles biocinétiques.

MODÈLES BIOCINÉTIQUES

Les modèles biocinétiques, ou modèles de transfert dans l'organisme, permettent d'identifier les organes sur lesquels les radionucléides peuvent se fixer et d'évaluer sur quelle période ils vont pouvoir être retenus ou au contraire en être éliminés. Ces modèles biocinétiques sont développés par la Commission Internationale pour la protection contre les rayonnements ionisants (CIPR).

Les rayonnements émis par les radionucléides n'ont pas tous la même dangerosité. Il s'agit ensuite d'évaluer la **dose équivalente** qui dépend des rayonnements émis et l'effet biologique des radionucléides sur chaque organe.

Enfin, l'ensemble des effets sur l'homme sont intégrés pour tenir compte du fait que plusieurs organes peuvent être affectés par les radionucléides émis. Cette intégration sur l'ensemble de l'organisme conduit à l'estimation de :

- la **dose efficace**, qui s'exprime en Sievert (Sv). Cette dose efficace intègre la valeur de la dose absorbée par la matière vivante, la nature plus ou moins nocive des rayonnements et la sensibilité des organes affectés ;
- la **dose efficace engagée**, qui s'exprime également en Sievert (Sv). Cette dose tient compte des effets de l'exposition et de la rétention de radionucléides dans l'organisme dans la durée. Cette dose peut être calculée sur des durées variables, jusqu'à toute la durée de vie de l'individu.

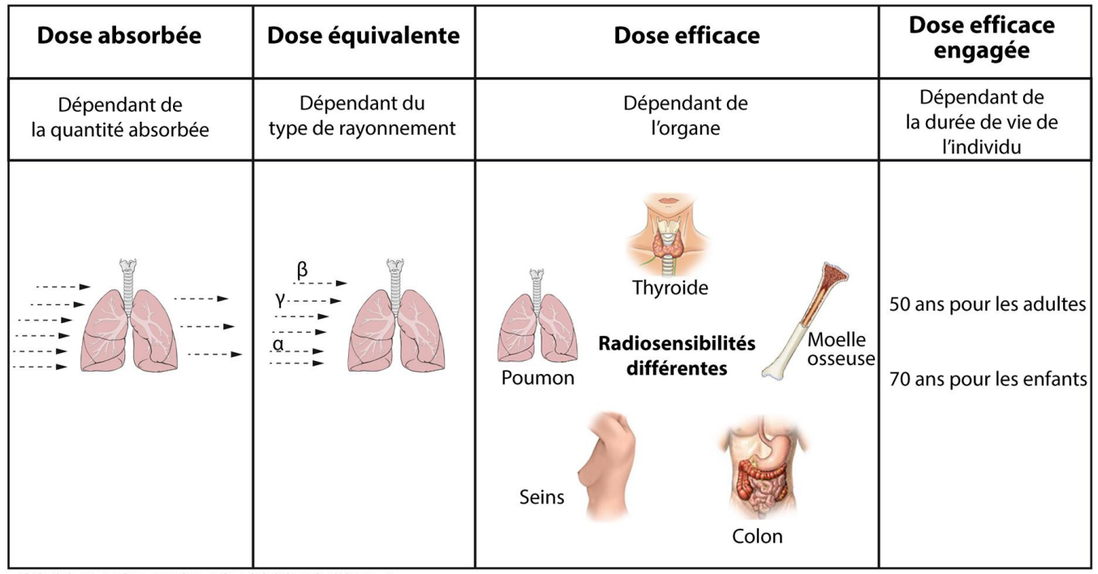


Figure 4-4 Illustration du passage de la dose absorbée à la dose efficace engagée

Des coefficients de doses définis par la réglementation française ou à défaut issus de travaux d'experts internationaux permettent de convertir une activité (en Becquerel) en dose (en Sievert).

CALCUL DE LA DOSE EFFICACE ENGAGÉE

L'exposition humaine (exprimée en dose efficace engagée) est estimée :

- en évaluant, à partir des activités absorbées (Bq) par les individus et à l'aide de coefficients de dose spécifiques à chaque radionucléide et chaque voie d'exposition, les doses efficaces engagées (Sv) de chacune des voies d'exposition, en distinguant si nécessaire les adultes des enfants ;
- en sommant les doses efficaces engagées de l'ensemble des voies d'expositions humaines.

Le calcul de la dose efficace engagée permet de convertir les becquerels (Bq) en millisieverts (mSv).

Les coefficients de dose efficace relatifs à l'exposition externe sont fonction de la nature de la source : exposition à l'air contenant les radionucléides ou à un dépôt de sol, pour le domaine terrestre. Les coefficients de dose efficace qui permettent de quantifier l'exposition externe à partir des activités de l'air et de la surface du sol sont fournis par le *Federal Guidance report* n° 12 de l'agence américaine de l'environnement US-EPA (34). Cette référence a été mise à jour en 2019 (35) et la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements ionisants (CIPR) a publié en 2020 des valeurs de coefficients de dose (36). Ces nouvelles valeurs ne modifient pas les résultats présentés ci-après.

Les facteurs de dose efficace relatifs à l'incorporation de radionucléides par la voie interne (inhalation et ingestion) sont ceux préconisés par l'arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants (37). Ces facteurs, spécifiques à chaque radionucléide, fournissent la dose efficace engagée pour chaque becquerel incorporé et dépendent de l'âge de la personne.

Par ailleurs, la dose efficace engagée due à l'inhalation de radionucléides dans l'air est fonction du débit respiratoire moyen sur une journée (à savoir, 0,96 m³/h pour l'adulte, 0,64 m³/h pour l'enfant de 10 ans et 0,3 m³/h pour l'enfant de 1 an).

La réglementation française, (articles R. 1333-11 et D. 1333-84 du code de la santé publique), fixe des limites d'exposition de l'homme contre les dangers des rayonnements ionisants. Il s'agit notamment :

- d'une dose efficace maximale admissible résultant des activités humaines en dehors de la radioactivité naturelle et des doses reçues en médecine de 1 mSv/an ;
- dans le cas d'accidents nucléaires, des niveaux d'intervention exprimés en termes de doses servent de repères aux pouvoirs publics pour décider, au cas par cas, des actions à déclencher en cas d'urgence radiologique sur 24 heures :
  - ✓ la mise à l'abri, si la dose efficace prévisionnelle dépasse 10 mSv ;
  - ✓ l'évacuation, si la dose efficace prévisionnelle dépasse 50 mSv.

Cas particulier du tritium pour le calcul de la dose efficace engagée

Le tritium peut être rejeté sous forme de vapeur d'eau tritiée (HTO) et d'hydrogène tritié (HT). Bien qu'une partie du rejet puisse être effectuée sous forme d'hydrogène tritié, tous les calculs d'exposition sont effectués en considérant qu'il est entièrement rejeté sous forme de vapeur d'eau tritiée (HTO). Cette forme chimique du tritium au moins 10 000 fois plus radiotoxique que l'hydrogène tritié, est retenue dans une démarche enveloppe. Il est à noter que le tritium est un radionucléide peu radiotoxique par rapport aux autres radionucléides gazeux susceptibles d'être rejetés.

Par ailleurs, la dose efficace engagée par incorporation transcutanée de tritium est égale à un tiers de l'incorporation totale sous forme d'eau tritiée, conformément aux recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (38).

Exposition au bruit de fond radiologique

» BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE

On désigne par « bruit de fond radiologique », les niveaux de radioactivité des différents radionucléides présents dans l'environnement, en dehors de toute influence anthropique actuelle (industrie nucléaire, autres industries, rejets hospitaliers…). Ce bruit de fond résulte d'une part de sources naturelles, et d'autre part de la rémanence de radionucléides artificiels qui ont concerné l'ensemble du territoire ; il s'agit notamment des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et des retombées de l'accident de Tchernobyl (39).

Pour rappel, l'exposition moyenne de la population française au bruit de fond radiologique (naturel et artificiel, en dehors des expositions médicales), est estimée à 2,9 mSv/an (40) (cf. Chapitre 1 du volume II de la présente étude d'impact).

Cette exposition varie en fonction du lieu de résidence (présence de radon dans l'air, rayonnement tellurique…) et du mode de vie (consommation de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels comme les fruits de mer, tabagisme, voyages en avion…).

» RADON

Le radon est un gaz rare radioactif issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents naturellement dans le sol et les roches. En se désintégrant, il forme des descendants non gazeux, eux-mêmes radioactifs. Ces descendants peuvent se fixer sur les aérosols de l'air et, une fois inhalés, se déposer le long des voies respiratoires en provoquant leur irradiation.

D'après les évaluations conduites en France présentées par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, le radon serait la seconde cause de cancer du poumon, après le tabac et devant l'amiante).

La fourchette basse a été évaluée à 1,6 mSv/an et correspond à un adulte vivant dans une commune à faible teneur en radon et à faible niveau de rayonnements telluriques, peu touchée par les retombées anciennes, consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et ne fumant pas (31). Les contributions au bruit de fond radiologique de ce niveau faible sont illustrées sur la figure 4-5 ci-dessous.

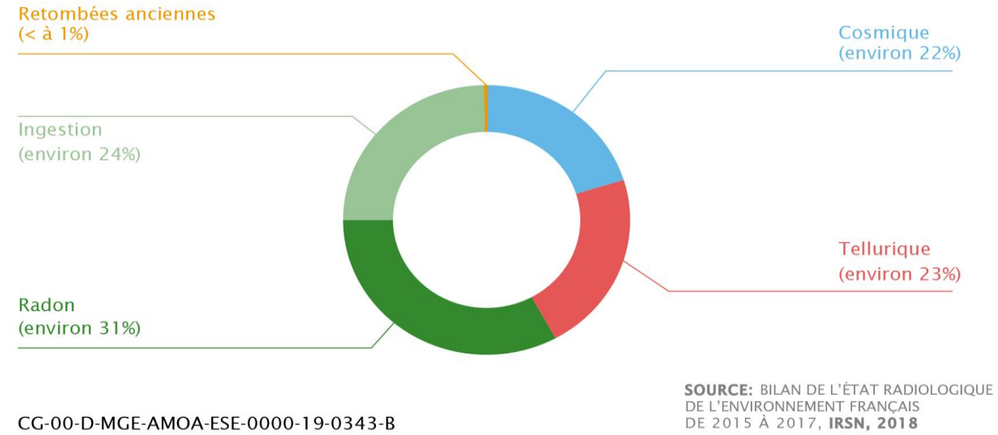


Figure 4-5 *Contributions à une dose liée au bruit de fond radiologique français (fourchette basse de 1,6 mSv/an)*

La fourchette haute a été évaluée à 8,6 mSv/an (31) correspondant à un adulte vivant dans une commune à forte teneur en radon et niveau élevé de rayonnements telluriques, fortement touchée par les retombées anciennes, fumant beaucoup, ayant une consommation importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant fréquemment en avion.

CAS 2 : 8,6 mSv/an

Adulte vivant dans une commune à forte teneur en radon et niveau élevé de rayonnements telluriques, fortement touchée par les retombées anciennes, fumant beaucoup, ayant une consommation importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant fréquemment en avion.

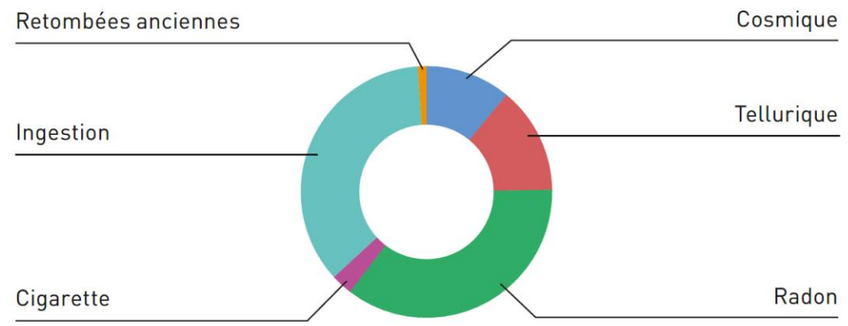


Figure 4-6 *Contributions à une dose liée au bruit de fond radiologique français (fourchette basse de 8,6 mSv/an)*

Le secteur de la Meuse/Haute-Marne correspond à la fourchette faible (zone à faible niveau de rayonnements telluriques, peu touchées par les retombées anciennes, et avec une faible teneur en radon) (cf. Chapitre 2.5.2 du volume III de la présente étude d'impact).

La figure 4-7 présente quelques exemples d'expositions de la vie quotidienne.

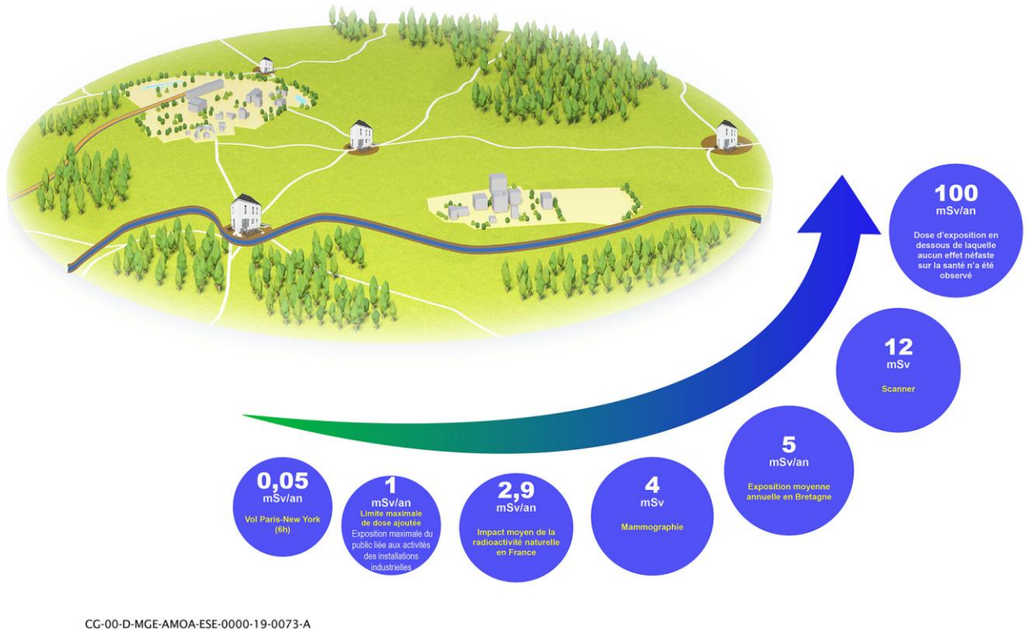


Figure 4-7 Quelques exemples d'exposition de la vie quotidienne

4.1.3 Incidences potentielles du projet global Cigéo

Les émissions radioactives du projet global Cigéo proviennent des colis de déchets qui sont acheminés vers le centre de stockage Cigéo puis transférés au sein des installations jusqu'aux alvéoles de stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien.

4.1.3.1 Les émissions liées au transport des colis de déchets

Pour pouvoir être transportés sur la voie publique, les déchets radioactifs sont conditionnés (déchets solidifiés et éventuellement immobilisés sous une forme non dispersable) et placés dans un conteneur, puis disposés dans un emballage de transport, adapté à leur dangerosité et à leurs conditions de transport.

Pour le projet global Cigéo, le transport ferroviaire est le moyen d'acheminement privilégié (cf. Chapitre 2.8.3 du volume II de la présente étude d'impact et figure 4-8 ci-dessous).



Figure 4-8 Photographie d'emballages de transport de déchets radioactifs sur un train

À titre indicatif, environ 10 % des colis de substances radioactives transportés en France sont en lien avec l'industrie électronucléaire. Cela représente de l'ordre de 20 000 transports annuels, pour plus de 100 000 colis de substances radioactives. Ces transports sont nécessaires au fonctionnement du cycle du combustible, du fait de la localisation des différentes installations sur le territoire national. Les transports à forts enjeux de sûreté sont plus particulièrement les transports d'hexafluorure d'uranium (environ 250 transports par an), les transferts de combustibles irradiés des centrales nucléaires vers l'usine de retraitement de La Hague dans la Manche (environ 200 transports par an) et les transports de plutonium pour la production de combustible MOX (une centaine de transports par an), mais aussi le transport de combustible neuf (environ 400 transports de combustible neuf à base d'uranium et une cinquantaine de transports de combustible neuf « MOX » à base d'uranium et de plutonium).

En France, le transport des substances radioactives sur voie publique est soumis à une réglementation stricte et à un suivi particulier (cf. Chapitre 11 du volume IV de la présente étude d'impact).

La réglementation applicable en France trouve ses sources dans les recommandations de l'Agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA) (36) et des conventions et accord européens relatifs au transport de marchandises dangereuses.

La réglementation de transport de substances radioactives par voie publique impose que :

- le débit d'équivalent de dose maximal reste inférieur à :
  - ✓ 2 $mSv.h^{-1}$ en tout point des surfaces extérieures du véhicule ;
  - ✓ 0,1 $mSv.h^{-1}$ à une distance de 2 mètres des surfaces latérales externes du véhicule.
- la contamination des surfaces accessibles de l'emballage de transport et du moyen de transport n'excède pas 4 $Bq.cm^{-2}$ pour les émetteurs bêta et gamma et les émetteurs alpha de faible toxicité et 0,4 $Bq.cm^{-2}$ pour les autres émetteurs alpha.

Le blindage des emballages de transport assure la protection contre les rayonnements ionisants d'une part et la résistance aux conséquences d'un accident (tels qu'une chute ou un incendie) d'autre part. À titre d'illustration, les déchets radioactifs de haute activité (HA) sont transportés dans des emballages en acier forgé dont la masse est de l'ordre d'une centaine de tonne.

Au démarrage du fonctionnement du centre de stockage Cigéo, le flux de convois de déchets radioactifs acheminés par voie ferroviaire est estimé à environ huit trains par an, puis, il s'intensifierait pour atteindre environ 80 trains par an, soit une moyenne d'environ six trains par mois, chaque train convoyant en moyenne dix wagons de transport.

La vitesse des trains est limitée à 80 km/h sur le réseau national, puis respectivement à 40 km/h et 30 km/h sur la ligne ferroviaire 027000 et sur l'installation terminale embranchée.

Les limites réglementaires relatives au débit d'équivalent de dose précitées permettent, pour un individu situé pendant une dizaine de minutes à une distance de deux mètres d'un wagon immobile chargé d'un emballage de transport de déchets radioactifs, de limiter la dose équivalente qu'il reçoit à environ 0,02 mSv.

Lorsqu'un individu est situé à une distance de deux mètres du passage d'un train de 10 wagons chargés d'emballages de transport de déchets radioactifs à des vitesses de 30 ou 40 km/h, la dose efficace corps entier de l'individu est de l'ordre de quelques de microsieverts en tenant compte d'hypothèses pénalisantes. Celle-ci s'avère plus faible encore pour une vitesse de 80 km/h.

Un même individu qui serait situé à une distance de deux mètres du passage de tous les trains intégrerait annuellement une dose efficace engagée de l'ordre de quelques dizaines de microsieverts.

S'agissant des limites maximales de contamination imposées par la réglementation, il convient de noter, d'une part que ces limites s'avèrent particulièrement basses, d'autre part que les emballages de transport sont recouverts de *canopy* (transport sur wagon) ou de bâches (transport par route) ce qui contribue à limiter une éventuelle dissémination de radionucléides.

De plus, l'installation terminale embranchée du projet global Cigéo est une infrastructure privée ce qui réduit le nombre de promeneurs aux alentours, le site n'étant pas attractif. Par ailleurs, le chemin longeant la voie n'est pas ouvert à la circulation des autres usagers. La largeur totale de la voie et du chemin s'élève à environ neuf mètres.

Compte tenu de ces éléments, l'exposition aux convois de transport est extrêmement faible et limitée dans le temps.

4.1.3.2 Les émissions liées aux activités au sein des installations du centre de stockage Cigéo

Pour rappel, les colis de déchets ne subissent aucune transformation dans les installations du centre de stockage Cigéo et ne sont notamment pas ouverts. Les activités effectuées au sein des installations impliquant les colis de déchets sont limitées à des opérations de manutention (extraction des emballages de transport, insertion dans des conteneurs ou paniers de stockage, transfert dans des hottes jusqu'aux alvéoles de stockage) et de contrôle à chaque étape avant leur stockage en alvéole.

Les émissions radioactives au sein des installations du centre de stockage Cigéo proviennent :

- du relâchement de quelques radionucléides gazeux (tritium, ^{14}C, ^{85}Kr), en très faible quantité, par certains colis de déchets MA-VL ;
- de la présence potentielle de contamination sur les surfaces externes des emballages de transport de déchets qui sont réceptionnés, dans la limite acceptée par la réglementation des transports ;
- de la récupération potentielle de petites quantités d'effluents collectés issus des zones à production possible de déchets nucléaires du centre de stockage, relevant de la réglementation des installations nucléaires de base (INB) (41).

4.1.3.2.1 Les émissions gazeuses

Les émissions de radionucléides gazeux proviennent de certains colis de déchets dans lesquels ils sont présents et ne sont pas piégés dans une matrice. Il s'agit de certains colis de déchets MA-VL qui contiennent les radionucléides gazeux suivants :

- du ^{3}H (tritium) : le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène, le plus petit atome. C'est un émetteur bêta (électron) de très faible énergie avec une période radioactive de 12,3 ans. Le tritium est un radionucléide faiblement radiotoxique. Il est également produit naturellement par action des rayons cosmiques (neutrons) avec divers composants de l'atmosphère ;
- du ^{14}C (carbone 14) : le ^{14}C est un isotope radioactif du carbone. C'est également un émetteur bêta (électron) de faible énergie avec une période radioactive de 5 730 ans. Sur terre, il est également formé lors de l'absorption de neutrons par les atomes d'azote de la stratosphère et des couches hautes de la troposphère ;
- du ^{85}Kr (krypton 85) : le ^{85}Kr est l'isotope radioactif du krypton. C'est un émetteur bêta (électron) et gamma (photon) d'énergie un peu plus élevée avec une période radioactive de 10,756 ans. Le ^{85}Kr est également produit naturellement dans de petites quantités par l'interaction du rayonnement cosmique avec le ^{84}Kr stable dans l'atmosphère.

Ces trois radionucléides, émis par certains colis de déchets MA-VL en très faible quantité (cf. Chapitre 4.3.2 du présent volume), sont faiblement radiotoxiques et volatils.

4.1.3.2.2 Les émissions particulaires

Les émissions particulaires proviennent de particules contenant des radionucléides émetteurs alpha et bêta pouvant être présents sur la surface externe des colis de déchets radioactifs (aussi appelée contamination surfacique labile) en très faible quantité (cf. Chapitre 4.3.2 du présent volume) et potentiellement mis en suspension par l'effet de la ventilation des locaux ou zones dans lesquels ils sont présents.

Les incidences potentielles des émissions radioactives atmosphériques (gazeuses ou particulaires) sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées ci-après.

4.1.3.2.3 Les effluents liquides non conventionnels

Le process nucléaire pour le stockage des colis de déchets radioactifs du centre de stockage Cigéo ne génère pas d'effluents radioactifs liquides. Pendant le fonctionnement de l'INB, certains effluents collectés dans les zones à production possibles de déchets nucléaires (par exemple, liés aux condensats des unités intérieures de récupération d'énergie du bâtiment nucléaire de surface EP1) ou dans le système de collecte des eaux d'exhaure des alvéoles HA (eaux ayant été au contact des colis de déchets) peuvent contenir des substances radioactives. Ces effluents liquides, dits « non conventionnels » ne sont pas rejetés localement et font l'objet d'une gestion distincte à savoir leur collecte et leur envoi vers une filière externe dédiée au traitement des déchets liquides radioactifs (cf. Chapitre 10 du volume IV de la présente étude d'impact).

Les incidences potentielles des effluents liquides non conventionnels sur la santé humaine sont significatives. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées ci-après.

4.2 Mesures d'évitement et de réduction

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions de substances radioactives, ainsi que leurs effets attendus et modalités de suivi sont présentés dans les chapitres 2 et 10 du volume IV de la présente étude d'impact :

- E3.2b : conditionnement définitif des déchets radioactifs (colis primaires), selon les spécifications d'acceptation fixées par l'Andra ;
- R2.2z : systèmes de ventilation nucléaires équipés de filtres à très haute efficacité (rétention de 99,9 % des aérosols au minimum) ;
- R2.2z : émissaires de rejets canalisés en hauteur ;
- E3.2b : absence d'ouverture des colis, de reconditionnement ou de traitement des déchets HA et MA-VL ;
- R2.2z : réduction à la source des quantités de déchets radioactifs produits ;
- R2.2z : tri des déchets solides et effluents non conventionnels à la source ;
- R2.2q : conditionnement adapté des déchets induits ;
- R2.2q : contrôles et caractérisations radiologiques ;
- R2.2q : traçabilité des déchets radioactifs ;
- R2.2q : filières de gestion adaptées et autorisées.

Ces mesures ont pour effet d'éviter la dispersion d'éléments radioactifs et de réduire les rejets d'aérosols radioactifs dans l'air. Les rejets en hauteur permettent également une meilleure dispersion et donc une meilleure dilution dans l'atmosphère.

4.3 Incidences résiduelles

4.3.1 Démarche générale d'évaluation des effets de rejets radioactifs sur la santé humaine

Pour rappel, les incidences (effets) liées aux émissions radioactives sur la santé (cf. Chapitre 4.1 du présent volume de l'étude d'impact) sont évaluées à partir des quantités de radionucléides rejetés. La modélisation de la dispersion de ces rejets de substances dans l'air ou dans l'eau permet de calculer les concentrations des radionucléides dans les différents compartiments de l'environnement. Ces concentrations ajoutées permettent ensuite d'estimer l'exposition humaine induite, en tenant compte des différents modes de transfert de l'environnement à l'homme. L'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions radioactives est ainsi réalisée en plusieurs étapes :

- une évaluation des quantités de radionucléides rejetés (ensemble des émissions) ;
- une évaluation de la dispersion de ces rejets radioactifs dans l'air pour les émissions atmosphériques ou dans l'eau pour les effluents liquides ;
- une évaluation des transferts des radionucléides dans l'environnement et la chaîne agroalimentaire (par exemple dans les produits agricoles locaux) ;
- une évaluation de l'exposition humaine prenant en compte les habitudes de vie et l'utilisation de l'environnement local ;
- une caractérisation du risque sanitaire, en comparant l'exposition humaine à des valeurs seuils.

Le schéma détaillé récapitulant la démarche d'évaluation de l'exposition humaine et du risque sanitaire liée aux émissions radioactives est présenté au chapitre 8.3.1 du présent volume.

Le risque pour la santé humaine est analysé par comparaison de l'exposition humaine à des valeurs seuils fixées par la réglementation. Le code de la santé publique (article R. 1333-11) impose pour la population une limite annuelle d'exposition de 1 mSv reçue du fait des activités nucléaires, qui s'ajoute à la radioactivité naturelle et à celle issue des actes médicaux.

Pour le centre de stockage Cigéo, une dose efficace engagée de 0,25 mSv/an est retenue comme valeur seuil à ne pas dépasser en fonctionnement normal d'exploitation.

La méthode détaillée d'évaluation des incidences et des risques sur la santé humaine liés aux émissions radioactives est présentée au chapitre 8.3 du présent volume. Pour rappel, l'aire d'étude des incidences des émissions radioactives correspond à l'aire d'étude rapprochée du milieu physique du projet global Cigéo (populations potentiellement soumises à des modifications de la qualité de l'air).

4.3.2 Émissions radioactives liquides

Dès le début du fonctionnement du centre de stockage Cigéo et l'arrivée des colis de déchets radioactifs, certains effluents liquides, de par leur provenance ou leur utilisation, sont susceptibles d'être contaminés par des substances radioactives. C'est le cas lorsqu'ils sont issus :

- en souterrain, des alvéoles des quartiers HA (eaux d'exhaure des alvéoles ayant été au contact des colis de déchets) ;
- en surface, des zones à production possible de déchets nucléaires, dites ZppDN (par exemple, liés aux condensats des unités intérieures de récupération d'énergie du bâtiment nucléaire de surface EP1), notamment s'ils sont issus d'opérations de décontamination ou s'ils sont associés à des contrôles radiologiques.

Ces effluents sont dénommés « effluents liquides non conventionnels ».

Les quantités d'effluents liquides non conventionnels annuels estimées de manière enveloppe, au cours des premières décennies de fonctionnement de l'INB jusqu'à l'horizon 2080, sont de l'ordre de 90 m³/an (soit de l'ordre de 90 t/an). L'activité maximale[11] de ces effluents liquides non conventionnels, calculée de façon enveloppe, est de l'ordre de 10 Bq/L en alpha global et 100 Bq/L en bêta global. Ces quantités et niveaux de radioactivité ont été évalués sur des hypothèses très conservatives, très au-dessus des effluents réellement attendus.

Les installations nucléaires de surface sont équipées d'un réseau de collecte des effluents liquides non conventionnels relié à des cuves spécifiques dédiées. Dans la zone en exploitation de l'installation souterraine, les eaux d'exhaure arrivent par gravité en tête d'alvéole du quartier pilote HA et sont collectées dans des cuves de contrôle (cf. Chapitre 11.6.1.2 du volume IV de la présente étude d'impact). Ces eaux sont ensuite dépotées au fond par un camion-citerne, remontées par la descenderie de service puis acheminées jusqu'au local dédié du bâtiment nucléaire de surface EP1.

À l'issue du remplissage des cuves de collecte présentes dans le bâtiment nucléaire de surface EP1, les effluents font l'objet d'une caractérisation radiologique afin notamment de définir précisément les conditions de leur transport et de leur traitement.

À l'issue de la caractérisation radiologique, les effluents liquides non conventionnels sont dépotés à l'aide d'une pompe de relevage vers un camion-citerne agréé pour ce type de transport et envoyés dans une filière autorisée de traitement de déchets liquides à l'extérieur du site.

Le centre de stockage Cigéo ne rejette donc pas, dans l'environnement local, ces effluents liquides non conventionnels.

Les incidences des émissions radioactives liquides sur la santé humaine sont donc extrêmement faibles.

[11] D'après des calculs enveloppes basés sur la contamination surfacique maximale des colis de stockage au contact des eaux d'exhaure.

4.3.3 Émissions radioactives atmosphériques

4.3.3.1 Émissions radioactives atmosphériques

Comme présenté au chapitre 4.1.3 du présent volume, les émissions radioactives atmosphériques proviennent des gaz (tritium, ^{14}C et ^{85}Kr) émis par certains colis de déchets MA-VL et des aérosols potentiellement présents à la surface des colis de déchets radioactifs (radionucléides émetteurs alpha et/ou bêta) qui peuvent être mis en suspension dans les alvéoles par la ventilation et qui ne sont pas retenus par les filtres des systèmes de ventilation nucléaire.

Les évaluations sont réalisées en considérant une situation pénalisante, à savoir :

- les colis de déchets présentant des émissions de radionucléides gazeux sont considérés comme susceptibles d'être présents simultanément dans l'installation nucléaire de surface et dans l'installation souterraine (stockage en alvéole) ;
- l'ensemble des colis reçus est considéré comme pouvant présenter une contamination surfacique labile au niveau maximal des seuils autorisés ;
- les caractéristiques des radionucléides gazeux sont évaluées à partir des données de connaissances fournies par les producteurs de déchets radioactifs, de façon majorée sans tenir compte de la capacité de rétention de ces gaz par le conteneur. Concernant les aérosols, l'efficacité des filtres très haute efficacité est considérée égale à 99,9 % (minimum requis par la norme de fabrication).

La méthode d'évaluation des émissions radioactives gazeuses est présentée en détail en annexe 2 du présent volume.

4.3.3.2 La localisation des émissions radioactives atmosphériques

Les émissions gazeuses et particulaires liées à la présence colis de déchets radioactifs dans le centre de stockage Cigéo sont à l'origine de rejets dans l'atmosphère. Ces rejets atmosphériques sont effectués *via* des émissaires équipés de filtres permettant de les canaliser et de les surveiller.

Ces émissaires, illustrés sur la figure 4-9, sont :

- une cheminée reliée à l'usine de ventilation de la zone puits, qui canalise et contient l'instrumentation de la surveillance de l'extraction d'air de la zone souterraine en exploitation, d'une hauteur d'environ 12 mètres ;
- une cheminée en toit de l'installation nucléaire de surface située sur la zone descenderie, d'une hauteur de l'ordre de 20 mètres, soit un émissaire de rejets situé à une hauteur d'une trentaine de mètres par rapport aux voiries d'accès du bâtiment.



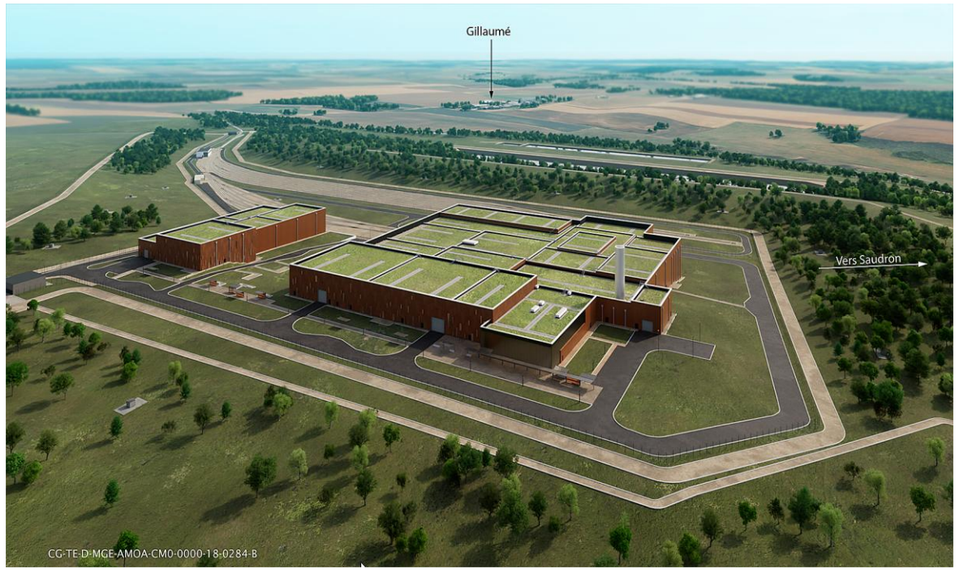


Figure 4-9 *Illustrations de l'usine de ventilation nucléaire de la zone puits (en haut) et de l'installation nucléaire de surface (en bas) avec leurs cheminées*

Les positions des deux émissaires sont représentées sur la figure 4-10 ci-dessous.

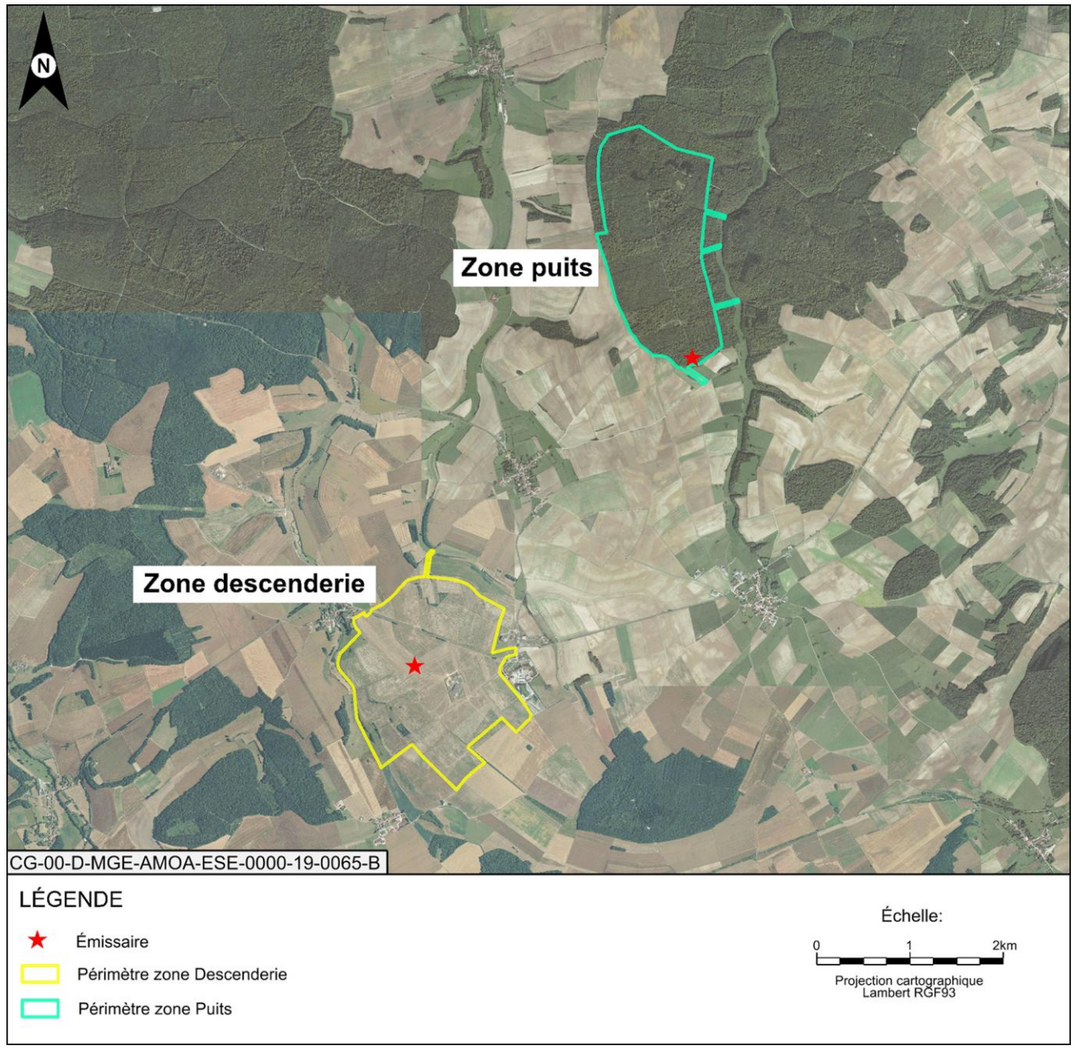


Figure 4-10 *Localisation des émissaires de rejets atmosphériques radioactifs du centre de stockage Cigéo*

Les rejets radioactifs atmosphériques issus de l'installation nucléaire de surface

Les rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux sont évalués au niveau de l'installation nucléaire de surface, du bâtiment nucléaire EP1, et sur toute la durée de fonctionnement de cette installation.

Le bâtiment nucléaire EP2, dont la construction n'est envisagée qu'après plusieurs décennies de fonctionnement, recevra une majorité de colis de déchets HA vitrifiés qui n'émettront pas de radionucléides gazeux et quelques colis de déchets MA-VL qui ne sont pas encore produits. Le conditionnement de ces derniers devra respecter les spécifications d'acceptation des colis de l'Andra et s'appuyer sur les meilleures techniques disponibles du moment. Les rejets radioactifs atmosphériques annuels durant cette période de fonctionnement d'EP2 seront très faibles et du même ordre de grandeur que ceux réalisés durant le fonctionnement du bâtiment nucléaire EP1.

Le nombre de colis présents chaque année dans l'installation nucléaire de surface est considéré égal au nombre maximal de colis pouvant y transiter. Les rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux issus de l'installation nucléaire de surface, située sur la zone descenderie, sont présentés dans le tableau 4-1 ci-dessous.

Ces rejets sont exprimés en becquerel (Bq) ou gigabecquerel (GBq) par an.

GIGA

Giga (symbole G) est le préfixe du Système international d'unités (SI) qui représente 10^9, soit un milliard de fois l'unité qui suit (1 GBq = 1 milliard de becquerels).

Tableau 4-1 *Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation nucléaire de surface du centre de stockage Cigéo*

Cheminée de l'installation nucléaire de surface	Rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux
Tritium	De l'ordre de 3 GBq/an
^{14}C	De l'ordre de 3 GBq/an
^{85}Kr	De l'ordre de 50 GBq/an
Émetteurs beta	De l'ordre de 600 Bq/an
Émetteurs alpha	De l'ordre de 60 Bq/an

Les radionucléides gazeux (^3H, ^{14}C, ^{85}Kr) ne sont pas retenus par les filtres contrairement aux aérosols (émetteurs alpha et bêta) qui sont filtrés à 99,9 %.

Les rejets radioactifs atmosphériques issus de l'installation souterraine

Les rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux sont évalués au niveau de la cheminée de ventilation de la zone en exploitation de l'installation souterraine, située en zone puits, et sur toute la durée de fonctionnement de cette installation.

Ils sont présentés dans le tableau 4-2 ci-dessous.

Tableau 4-2 *Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo*

Cheminée de l'installation souterraine	Rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux
Tritium	De l'ordre de 300 GBq/an
^{14}C	De l'ordre de 300 GBq/an
^{85}Kr	De l'ordre de 5 000 GBq/an
Émetteurs bêta	De l'ordre de 85 000 Bq/an
Émetteurs alpha	De l'ordre de 8 500 Bq/an

Les rejets de l'installation souterraine représentent la source majoritaire. Les rejets de l'installation nucléaire de surface, localisée sur la zone descenderie, sont négligeables devant ceux de la cheminée de l'installation souterraine.

4.3.3.3 Dispersion des rejets radioactifs

Pour rappel, la majorité des émissions radioactives sont canalisées et filtrées (permettant de retenir plus de 99,9 % des particules) avant leur rejet. La dispersion des rejets des installations du centre de stockage Cigéo s'effectue par voie atmosphérique, au niveau de chaque cheminée. Elle dépend de plusieurs paramètres :

- les caractéristiques du rejet (gaz et aérosols radioactifs pour les émissions radioactives) ;
- le mode d'émission (rejet continu en hauteur *via* les cheminées) ;
- les conditions météorologiques (vent, température, pluviométrie aux alentours) ;
- l'environnement (milieu rural avec présence de villages sur une étendue de plusieurs kilomètres).

Le logiciel utilisé pour modéliser la dispersion atmosphérique, données d'entrée des calculs dosimétriques, est la plateforme de calcul CERES (Code d'évaluations rapides environnementales et sanitaires) version 6.2.14, en particulier le module GASCON (42, 43), basé sur un modèle gaussien. Cet outil est également l'outil de référence du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Ces outils ont déjà été analysés par l'Autorité de sûreté nucléaire et son support technique l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

La modélisation de la dispersion permet de calculer les moyennes annuelles en concentrations dans l'air et en dépôts au sol de chaque élément radioactif rejeté au niveau des cheminées. Le modèle utilisé est présenté en détails au chapitre 2.4.2.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

L'environnement du projet global Cigéo est rural, avec des zones agricoles hétérogènes, et présente peu d'obstacles à la bonne dispersion des rejets.

La modélisation de la dispersion atmosphérique des rejets radioactifs du centre de stockage Cigéo montre que les concentrations en gaz et aérosols radioactifs diminuent significativement avec la distance.

Afin de localiser le maximum de concentration dans l'air sur le domaine d'étude du modèle de dispersion atmosphérique, un autre logiciel que CERES, code retenu en référence pour les calculs, a été utilisé. Il s'agit du code IMPACT développé par ARIA Technologies (44). L'avantage de CERES est qu'il couple le modèle de dispersion atmosphérique avec le modèle de transferts au travers des chaînes agroalimentaires vers l'Homme et donc permet de calculer les doses directement à partir des rejets. IMPACT, qui modélise uniquement la dispersion atmosphérique, possède des fonctions supplémentaires telles que localiser un point maximum de concentration sur le domaine d'étude et cartographier le panache issu de la modélisation. Les deux codes montrent des résultats similaires de l'ordre du mBq/m³ (0,001 Bq/m³) pour le tritium et le carbone 14 rejetés par le centre de stockage Cigéo.

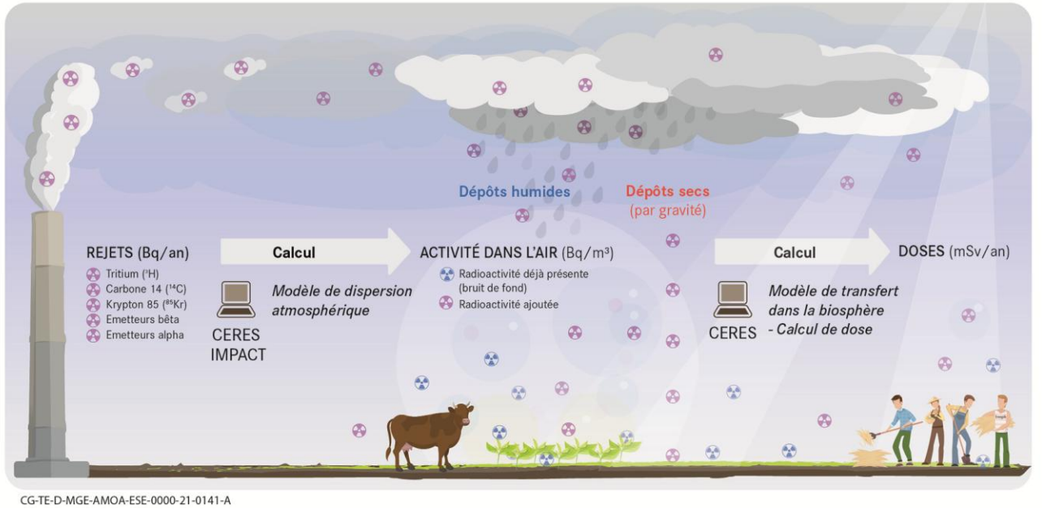


Figure 4-11 Schéma présentant les modèles et codes utilisés pour la dispersion atmosphérique et les calculs de dose

Les résultats de la modélisation de la dispersion du tritium, obtenus avec le code IMPACT d'ARIA Technologies, associés aux rejets atmosphériques maximaux (phase de fonctionnement) sont présentés sur la figure 4-12. Sur cette figure, les zones en « bleu clair » qui représentent les concentrations les plus importantes dans l'air correspondent à des concentrations très faibles en tritium, comprises entre 0,0001 Bq/m³ et 0,04 Bq/m³. Ces résultats reflètent l'influence des conditions météorologiques représentatives du site (rose des vents). En effet, les deux principaux panaches, sud-ouest et nord-est, correspondent aux deux directions principales de vent à la station d'Houdelaincourt. Les concentrations dans le panache nord-ouest sont variables autour de l'Ormançon du fait que les émissions ont lieu au niveau du plateau. Ainsi, les vallées ne sont pas directement dans le panache et les concentrations en fond de vallée sont plus faibles. Les dépôts au sol ne sont pas affectés par cet effet de vallée (cf. Figure 4-13). Les autres radionucléides rejetés montrent des panaches semblables, avec des niveaux de concentration très faibles.

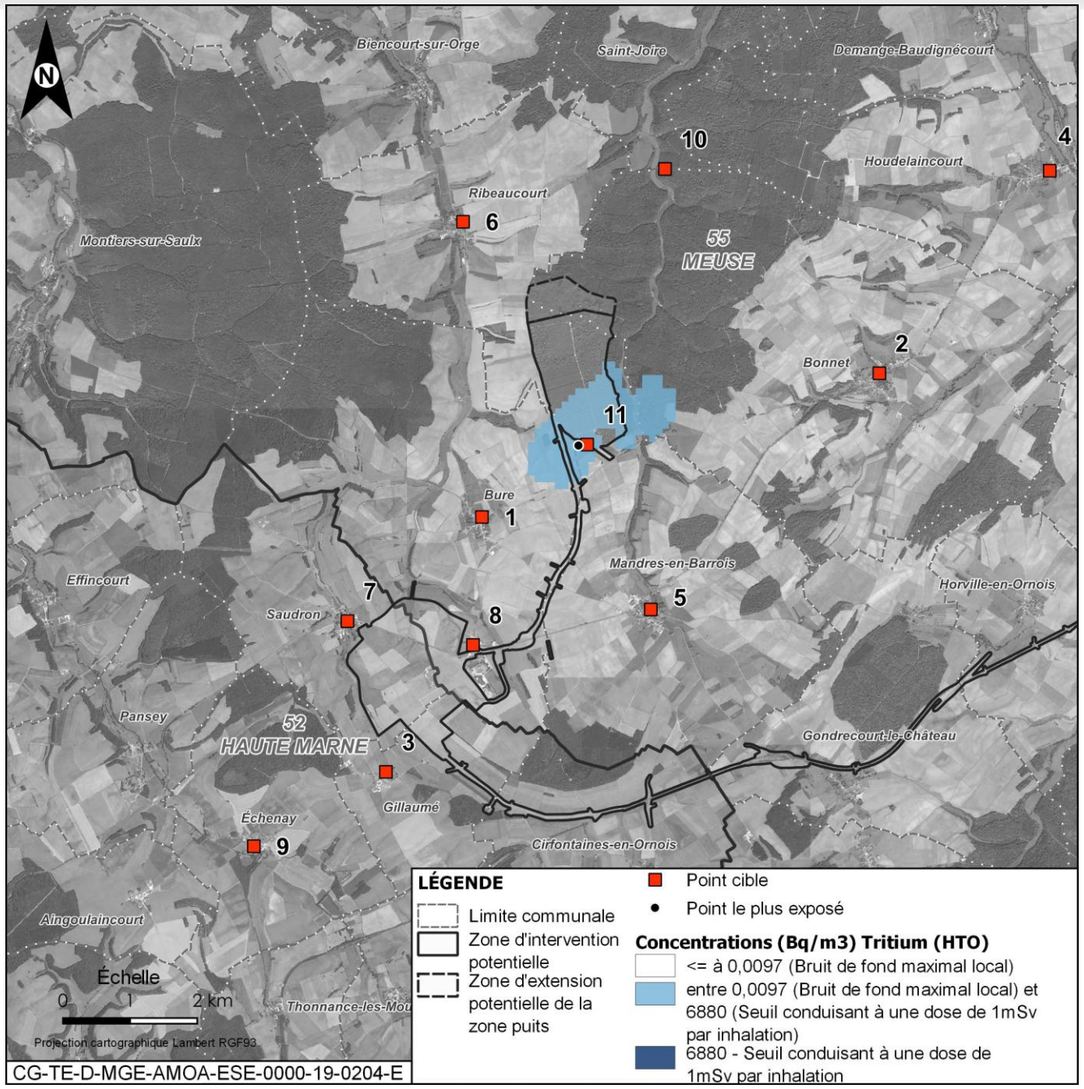


Figure 4-12 *Illustration de l'évaluation des concentrations dans l'air du tritium associé aux rejets du centre de stockage Cigéo*

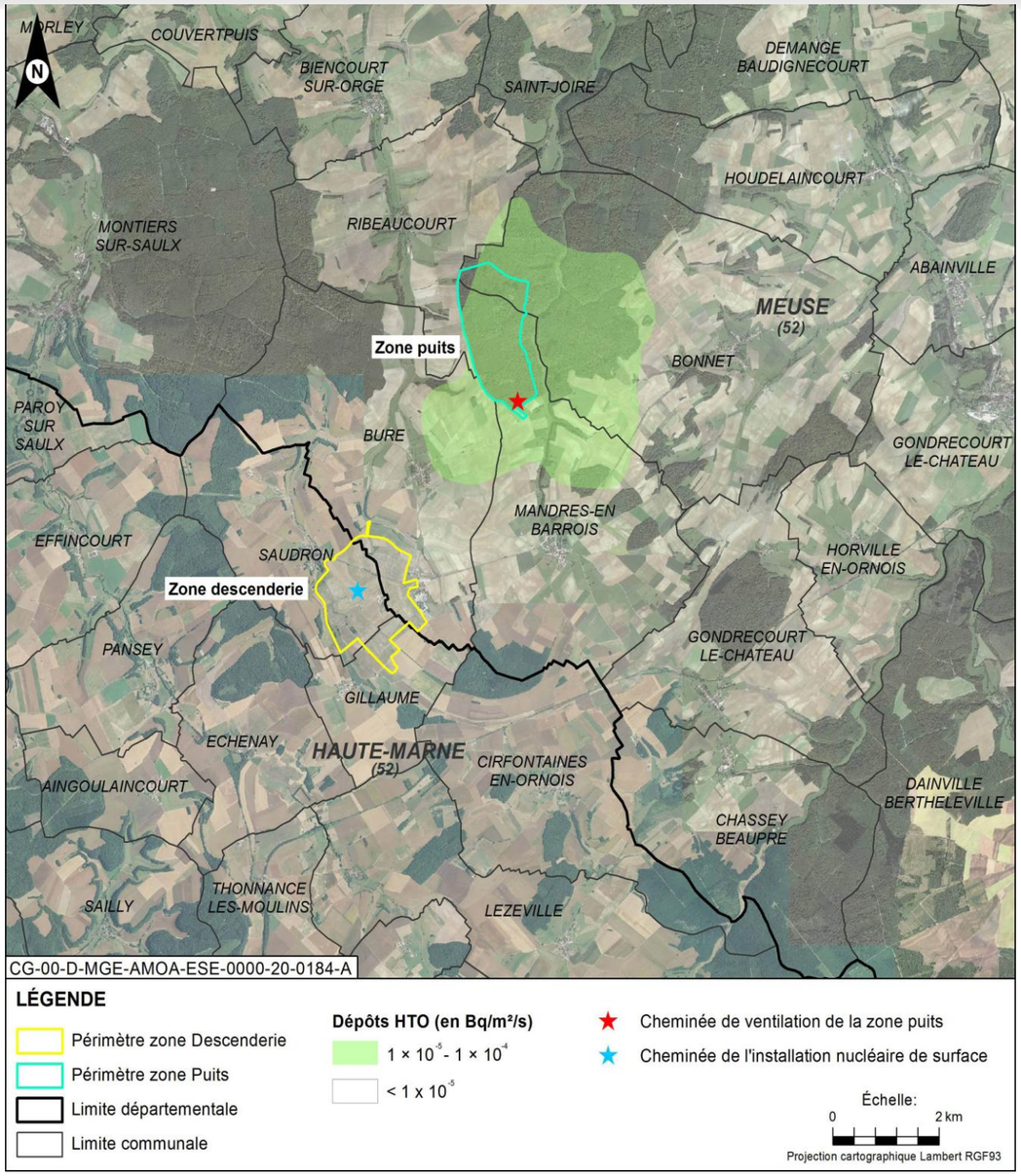


Figure 4-13 *Illustration de l'évaluation des dépôts au sol de tritium associés aux rejets du centre de stockage Cigéo*

Les concentrations calculées sont maximales au niveau du village de Bure (populations les plus exposées, cf. Chapitre 4.3.3.5 du présent volume de l'étude d'impact) pour l'ensemble des radionucléides rejetés. Elles sont restituées dans le tableau 4-3 ci-après.

Tableau 4-3 *Concentrations dans l'air et dépôts annuels au sol des radionucléides émis par le centre de stockage Cigéo en phase de fonctionnement, au niveau du village de Bure*

	Concentration dans l'air	Dépôts annuels au sol
Tritium	15 mBq/m³	700 Bq/m²/an si le tritium est considéré entièrement sous forme de vapeur d'eau tritiée, sinon pas de dépôt sous forme gazeuse (hydrogène tritié).
^{14}C	20 mBq/m³	Sans objet (pas de dépôt pour les gaz)
^{85}Kr	300 mBq/m³	Sans objet (pas de dépôt pour les gaz)
Émetteurs beta	De l'ordre du nanoBq/m³	<0,001 Bq/m²/an
Émetteurs alpha	De l'ordre du nanoBq/m³	<0,0001 Bq/m²/an

» NANO

Nano (symbole n) est le préfixe du système international d'unités (SI) qui représente 10^{-9}, soit un milliardième d'unité.

4.3.3.4 Voies d'exposition humaine

Les radionucléides rejetés dans l'atmosphère peuvent atteindre l'homme par le biais de l'air dans lequel il se trouve et qu'il respire, du dépôt au sol de particules, et/ou du transfert à d'autres milieux comme la chaîne alimentaire. Le module Gascon de la plateforme CERES permet, après le calcul de dispersion atmosphérique, le calcul des transferts dans la chaîne alimentaire et des doses reçues par l'Homme.

En effet, une partie des radionucléides dispersés dans l'atmosphère se dépose sur le sol ou sur la végétation rencontrée. Elle migre ensuite dans la terre, dans les végétaux et dans les fourrages qui sont utilisés pour nourrir les animaux (cf. Figure 4-14).

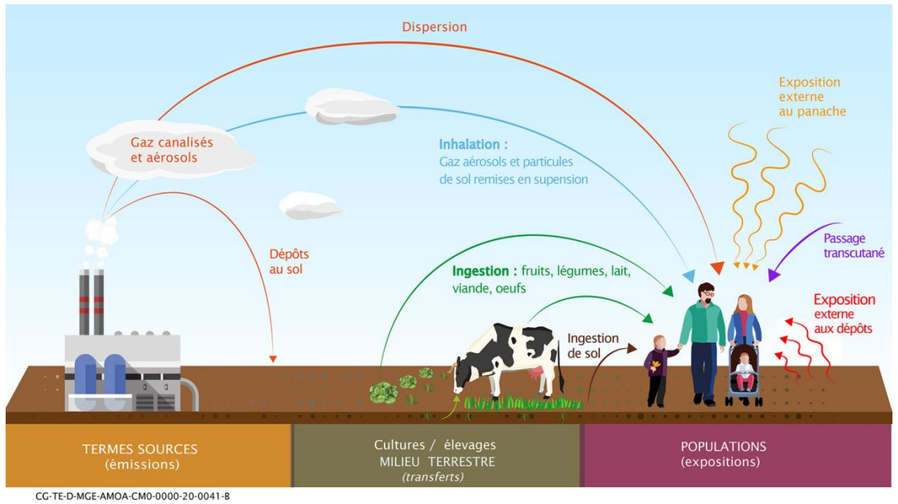


Figure 4-14 *Schématisation du transfert des radionucléides rejetés dans l'atmosphère*

La concentration en radionucléides dans les produits d'origine végétale est évaluée en prenant en compte le dépôt direct sur les feuilles et indirect *via* l'absorption par les racines. Pour les produits d'origine animale, leur alimentation est considérée comme assurée par les produits locaux (céréales, herbe, foin).

Les différentes voies d'exposition de l'homme sont les suivantes :

- exposition interne par inhalation due à l'immersion dans le panache ;
- exposition externe par irradiation due à l'immersion dans le panache ;
- exposition externe par irradiation à la suite de la présence sur le dépôt au sol ;
- la consommation de végétaux, pour lesquels la radioactivité résulte principalement des dépôts d'aérosols et de gouttes de pluie (voie directe) mais aussi des transferts racinaires à partir du sol (voie indirecte ou racinaire), et qui conduit à une exposition interne par ingestion ;
- l'ingestion de produits issus d'animaux, qui ont consommé des aliments contenant des radionucléides.

Le tritium peut aussi être incorporé chez l'homme par transfert cutané (capacité à traverser la peau qui n'est pas une membrane complètement étanche).

L'estimation de l'impact dosimétrique est réalisée par l'enchaînement de trois modules de calcul décrivant respectivement : la dispersion atmosphérique, le transfert dans la biosphère et l'impact sur l'homme. La plateforme CERES calcule ainsi la dispersion des gaz et des aérosols dans l'environnement (contamination de l'air et dépôt au sol), leur transfert dans la biosphère (sols, végétaux et animaux) et leur impact sur l'homme (doses individuelles efficaces et aux organes, exposition externe au panache et au dépôt, exposition interne par inhalation et ingestion).

À partir des concentrations dans l'air et des dépôts au sol calculés la plateforme de calcul permet d'en déduire les concentrations ou activités associées à chaque radionucléide dans les produits végétaux et animaux, en Becquerels (Bq).

La contribution des voies d'exposition par ingestion de sol par inadvertance ou par inhalation de particules de sol mises en suspension est négligeable par rapport aux autres voies d'exposition. De même, l'irradiation directe des installations sur le public hors clôture st négligée puisque celle-ci est au maximum de 1 nanosievert/an au niveau du site dans les zones les plus éloignées des installations.

Les activités ajoutées dans la chaîne alimentaire, pour les aliments d'origine végétale et ceux d'origine animale sont au maximum de quelques Bq par kg en tritium et carbone 14 (non détectables et de l'ordre de la radioactivité naturelle des produits). Les teneurs ajoutées en autres radionucléides sont infinitésimales.

Compte tenu du niveau des dépôts, de la surface et des débits des cours d'eau locaux, l'ensemble des dépôts dans les cours d'eau est également infinitésimal.

4.3.3.5 Évaluation de l'exposition des populations, liée aux émissions radioactives

Au regard des concentrations obtenues dans les différents milieux environnementaux (cf. Chapitre 4.3.3.3 du présent volume de l'étude d'impact), les personnes les plus exposées aux rejets radioactifs du centre de stockage au sein de la population de l'aire d'étude rapprochée du milieu physique (populations soumises à des modifications de la qualité de l'air) sont les habitants de Bure. Les populations plus éloignées, comme celles de Mandres-en-Barrois, Ribeaucourt, Bonnet, Saudron, Gillaumé et Houdelaincourt sont moins exposées.

L'exposition aux émissions radioactives dépend des habitudes de vie des individus. Elle est calculée pour l'adulte (17 ans et plus), l'enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 6 ans à 15 ans) et l'enfant de 1 an à 2 ans. Par ailleurs, de façon pénalisante, on considère un taux de présence des individus sur le lieu d'exposition égal à 100 % et un air à l'intérieur des habitations identique (les mêmes caractéristiques radiologiques) à l'air extérieur.

Les consommations alimentaires des populations résidentes proviennent d'une enquête locale réalisée en 2013 sur le territoire de Meuse-Haute-Marne (45). Sont prises en compte dans l'évaluation de l'exposition toutes les denrées alimentaires susceptibles d'être produites localement (le complément de la ration, non produit localement, n'est pas impacté par les émissions radioactives). Cette enquête n'ayant pas permis d'obtenir de résultats pour les enfants, les données de l'enquête nationale INCA3 de 2017 publiées par l'Anses (46) ont permis de calculer des ratios enfants/adulte qui ont été ensuite appliqués aux rations des adultes.

Tableau 4-4 *Rations alimentaires par classe d'âge, issues de l'enquête alimentaire locale (en kg/an)*

	Enfant de 1 à 2 ans	Enfant de 10 ans	Adulte
Salade	9,0	15,0	28,0
Carottes	5,0	8,0	16,0
P. de terre	15,0	27,0	31,0
Haricots	10,0	15,0	29,0
Pommes	22,0	26,0	30,0
Viande (Bovin)	2,0	3,0	4,0
Viande (Mouton)	2,0	4,0	5,0
Viande (Porc)	3,0	5,0	6,0
Œuf (Poule)	4,0	8,0	10,0
Viande (Poule)	3,0	6,0	8,0
Lait (Vache laitière)	36,0	51,0	29,0

4.3.3.6 Résultats de l'évaluation de l'exposition humaine liée aux émissions radioactives

Les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine maximale liée aux émissions atmosphériques radioactives du centre de stockage Cigéo à Bure sont restitués dans le tableau 4-5 ci-dessous (calcul utilisant le module Gascon de la plateforme CERES).

Tableau 4-5 *Doses efficaces engagées reçues par la population de Bure, liées aux émissions atmosphériques radioactives du centre de stockage Cigéo*

Classes d'âges de la population	Doses efficaces engagées à Bure
Enfant de 1 an à 2 ans	De l'ordre de 0,001 mSv/an
Enfant de 10 ans	De l'ordre de 0,001 mSv/an
Adulte de plus de 17 ans	De l'ordre de 0,001 mSv/an

Les doses efficaces engagées à Bure liées aux émissions radioactives du centre de stockage Cigéo sont de l'ordre de 0,001 mSv quelle que soit la classe d'âge de la population.

Ces doses sont liées à l'ingestion d'aliments locaux (contribution de l'ordre 99 %) dans lesquels est présent du carbone 14 (^{14}C).

Le carbone 14 est intégré dans le cycle du carbone, qui est très complexe en raison notamment de la présence de carbone sous formes minérales et organique, solide, liquide ou gazeuse. Émis sous forme de gaz, son dépôt est considéré nul et son comportement est traité suivant la méthode du rapport isotopique constant (rapport 14C/12C constant). L'absorption par les plantes, puis par les animaux, est ainsi considérée comme proportionnelle à celle du carbone 12 stable. La dose reçue annuellement n'évolue donc pas avec la durée de rejet, la dose à 50 ou 150 ans est la même que celle à 1 an.

La consommation de produits locaux ne conduit donc pas à une augmentation des doses efficaces engagées par la population au cours du temps.

Les doses efficaces engagées pour les autres villages environnants sont encore plus faibles. Compte tenu du niveau extrêmement faible de ces doses, les résultats de l'exposition au niveau de ces villages sont restitués sous forme de proportion par rapport à la dose reçue à Bure dans le tableau 4-6 ci-après.

Tableau 4-6 *Proportion de la dose reçue par la population des autres villages par rapport à celle de Bure*

Village	Distance à l'émissaire de la zone puits	Proportion de dose reçue
Bure	2 km	100 % (pour rappel <0,001 mSv/an)
Mandres-en-Barrois	2,6 km	40 %
Ribeaucourt	3,8 km	20 %
Bonnet	4,2 km	35 %
Saudron	4,6 km	35 %
Gillaumé	5,8 km	20 %
Houdelaincourt	7,7 km	20 %

Pour rappel, les rejets au niveau de l'émissaire de la zone puits sont les principaux contributeurs à la dose reçue car les rejets de l'installation souterraine – par l'usine de ventilation souterraine de la zone puits – sont majoritaires (cf. Chapitre 4.3.3.1 du présent volume).

L'exposition aux convois de transport, qui ne contiennent qu'un nombre limité de colis de déchets radioactifs, dont les passages sont peu fréquents et limités dans le temps compte tenu de leur vitesse, est extrêmement faible, très marginale par rapport à celle liée aux installations du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 4.1.3.1 du présent volume).

4.3.3.7 Analyse du risque sanitaire lié aux émissions radioactives

Le risque sanitaire est analysé par comparaison de l'exposition humaine à des valeurs seuils.

Pour rappel, la réglementation française (article R. 1333-11 du code de la santé publique) fixe une limite annuelle d'exposition de l'homme contre les dangers des rayonnements ionisants à 1 mSv/an (dose efficace maximale admissible ajoutée).

L'Andra considère que l'impact dosimétrique des installations de stockage en fonctionnement normal ne doit représenter, au maximum, qu'une fraction de la limite réglementaire. Pour la conception du centre de stockage Cigéo, la contrainte de dose retenue est de 0,25 $mSv.an^{-1}$ en phase de fonctionnement.

L'exposition humaine liée aux émissions du projet global Cigéo étant au maximum de l'ordre de 1 µSv/an, soit 0,001 mSv/an pendant la phase de fonctionnement, celle-ci est largement inférieure à la contrainte réglementaire de 1 mSv/an ajouté et de 0,25 mSv/an que l'Andra retient (cf. Figure 4-15). Elle est imperceptible au regard de l'exposition annuelle due à la radioactivité naturelle de la population française, même la moins exposée (moyenne à 2,9 $mSv.an^{-1}$ et fourchette basse, correspondant à la zone de Meuse/Haute-Marne, à 1,6 $mSv.an^{-1}$).

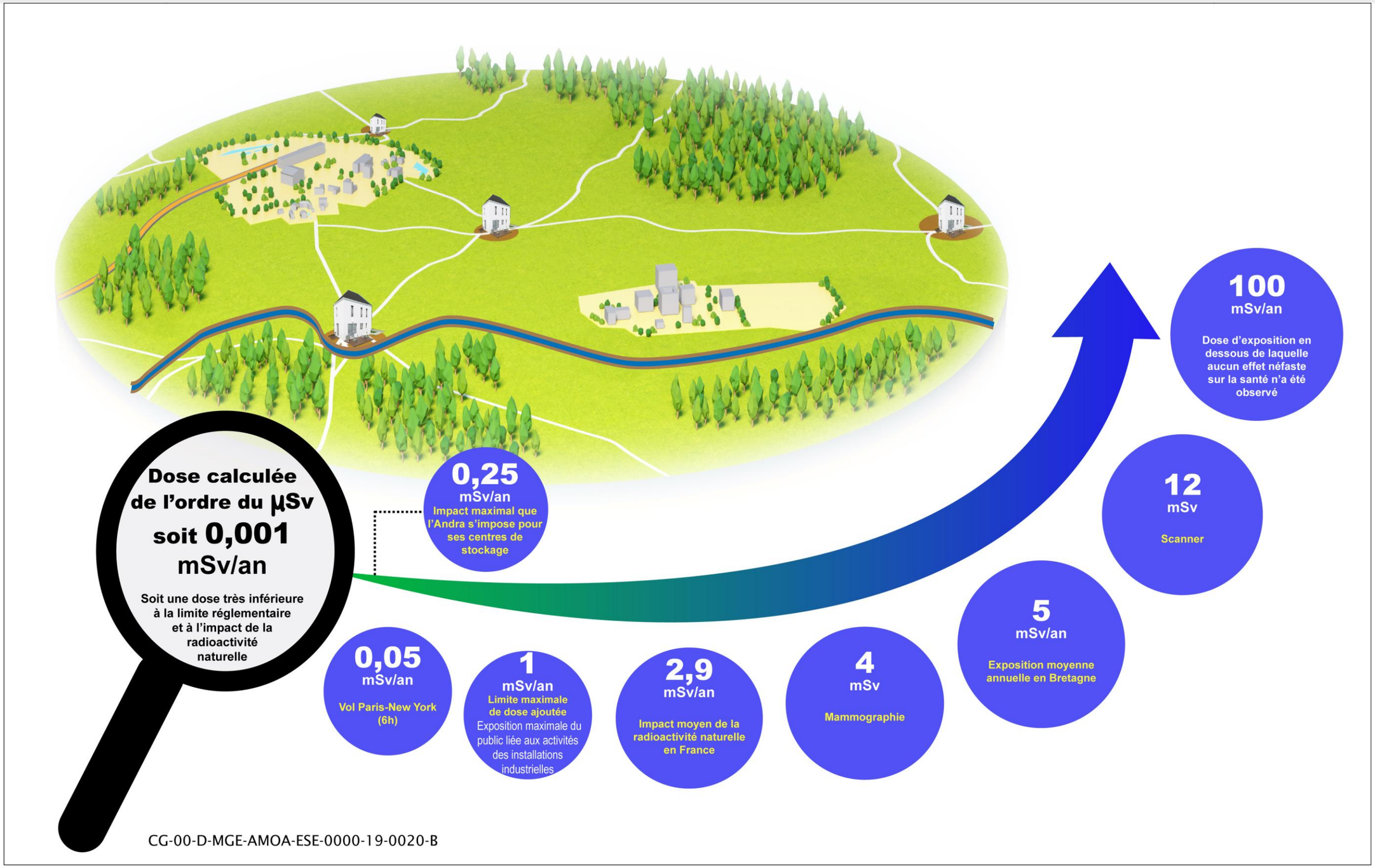


Figure 4-15 Valeurs repères d'exposition humaine aux émissions radioactives

Les activités du projet global sont éloignées de toute autre activité nucléaire, de plus d'une dizaine de kilomètres (à vol d'oiseau) pour les plus proches, à savoir :

- le projet de blanchisserie UNITECH à Suzannecourt est situé à environ 15 km (à l'ouest) ;
- les centres industriels de l'Andra dans l'Aube sont situés à environ 50 km (à l'ouest) ;
- le centre CEA de Valduc (au sud) et les centrales nucléaires de production d'électricité (CNPE) de Nogent-sur-Seine (à l'ouest) et de Cattenom (au nord-nord-est) sont situés à plus de 100 km.

4.3.3.8 Appréciation des incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions radioactives

Les incidences résiduelles du projet global Cigéo liées aux émissions atmosphériques radioactives sont très faibles à courte distance et ne se cumulent pas avec ces autres projets et installations de la région.

Les expositions aux émissions radioactives du projet global sont toutes à des niveaux largement inférieurs à la contrainte réglementaire de 1 mSv/an ajouté et à celle de 0,25 mSv/an retenue par l'Andra.

Les incidences résiduelles des émissions radioactives du projet global Cigéo sur la santé humaine en phase de fonctionnement sont très faibles.

5

Évaluation des incidences du stockage après fermeture sur la santé humaine

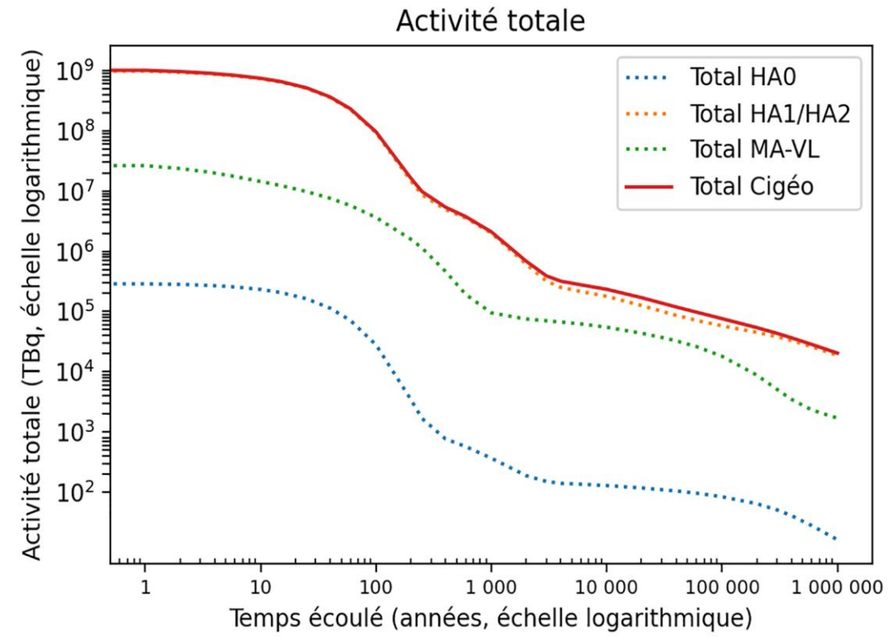
5.1 Incidences potentielles 72
5.2 Mesures d'évitement et de réduction 73
5.3 Incidences résiduelles 74

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour que la sûreté puisse être garantie de façon totalement passive après sa fermeture. L'évaluation de la sûreté après fermeture commence lorsque le centre de stockage est fermé, c'est-à-dire les puits et descenderies scellés conformément au guide n° 1 de l'ASN (47) (cf. Figure 5-2).

Les principaux éléments présentés dans le présent chapitre sont issus du chapitre 4 de la « Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » (48) du présent dossier.

5.1 Incidences potentielles

Même si la radioactivité des déchets HA et MA VL décroit dans le temps, les échelles de temps associées à leur dangerosité sont très longues (cf. Figure 5-1). En ordre de grandeur, ce n'est qu'au bout de plusieurs centaines de milliers d'années que leur radioactivité approchera la radioactivité initiale des déchets de faible activité qui peuvent être stockés en surface ou à faible profondeur.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR0-0000-21-0012-C

Figure 5-1 *Illustration de la décroissance dans le temps de la radioactivité totale des déchets de l'inventaire de référence de l'INB Cigéo (courbe rouge) et de la radioactivité de l'inventaire total des colis de déchets HA0, HA1/HA2 et MA-VL (courbes pointillées)*

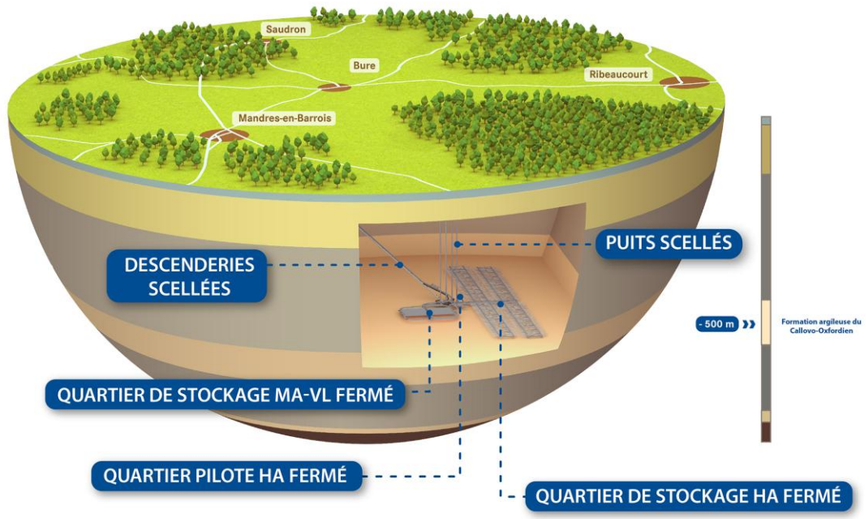
Après fermeture, la sûreté est assurée de façon passive, c'est-à-dire que l'homme et l'environnement sont protégés des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

La protection de l'homme et de l'environnement à long terme repose sur la couche du Callovo-Oxfordien, qui joue un rôle central de cette protection, complétée par des dispositifs ouvragés comme les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond (puits et descenderies) et les conditionnements des déchets. La figure 5-2 illustre le centre de stockage Cigéo après sa fermeture.

Les ouvrages de stockage vont se restaurer très lentement en eau. En présence d'eau, les colis de déchets HA et MA-VL vont se dégrader dans le temps, et les radionucléides et substances toxiques chimiques contenus dans ces colis de déchets vont alors peu à peu être relâchés dans les alvéoles de stockage. L'eau est le principal vecteur de la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques contenus dans les déchets vers la biosphère.

L'Andra a ainsi mis en place différentes mesures pour limiter les incidences potentielles sur l'homme et l'environnement.

Ces mesures d'évitement et de réduction sont présentées dans le chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact et sont rappelées ci-après.



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR0-0000-22-0031-A

Figure 5-2 *Illustration schématique du centre de stockage après sa fermeture définitive*

5.2 Mesures d'évitement et de réduction

Les mesures sont présentées en détail dans le chapitre 18.2.2 du volume IV de la présente étude d'impact et rappelées en synthèse ci-après.

Tableau 5-1 *Mesures d'évitement et de réduction en regard des principales fonctions de sûreté après fermeture du système de stockage déclinées de l'objectif de protection des intérêts*

Fonctions de sûreté après fermeture	Principes de conception
Fonction : Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales	
Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales	• implantation des galeries et ouvrages de stockage en profondeur (environ 500 mètres) dans la couche du Callovo-Oxfordien à l'écart des phénomènes de surface[12], en particulier l'érosion et à l'écart des structures géologiques, failles... ; • absence de ressources souterraines exceptionnelles ; • maintien des dispositifs de mémoire du stockage le plus longtemps possible après sa fermeture[13] (500 ans minimal selon le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47).
Fonction : Limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère	
Sous fonction : S'opposer à la circulation d'eau	• implantation dans la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle les écoulements d'eau sont faibles du fait notamment de sa faible perméabilité ; • regroupement des puits et de la base des descenderies au niveau de la couche du Callovo-Oxfordien et scellement de ces ouvrages pour favoriser la minimisation des circulations d'eau potentielles *via* ces derniers ; • architecture souterraine en grand « borgne » et quartiers de stockage « borgnes » par rapport au reste de l'installation souterraine, afin de minimiser les flux d'eau au sein du stockage en sollicitant uniquement les flux d'eau provenant du Callovo-Oxfordien, par nature faibles du fait notamment de sa faible perméabilité ; • scellements dans les ouvrages de liaison surface-fond et dans les galeries limitant les circulations d'eau par leur faible perméabilité à l'eau.
Sous fonction : Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques et les immobiliser dans l'alvéole	• conteneur de stockage HA qui permet (i) de retarder l'arrivée de l'eau sur les déchets et évite l'altération aqueuse en température et corrélativement (ii) de favoriser la maîtrise du comportement en solution des radionucléides et des substances toxiques chimiques relâchés dans l'alvéole ; • choix de matériaux d'alvéoles visant à favoriser une faible solubilité et/ou une rétention des radionucléides et des substances toxiques chimiques (*i.e.* L'environnement cimentaire dans les alvéoles MA-VL) ; • conditions physico-chimiques dans les alvéoles limitant le relâchement et la mobilité des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans l'alvéole (favoriser par exemple des conditions redox réductrices).
Sous fonction : Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques	• favoriser une implantation des ouvrages souterrains qui tire parti d'un maximum d'épaisseur de la couche du Callovo-Oxfordien de part et d'autre des alvéoles de stockage (composant important de par ses caractéristiques favorables) : architecture de type planaire (tenant compte des contraintes techniques de construction et d'exploitation) ; • géométries des alvéoles et des galeries de l'installation souterraine optimisées, particulièrement leurs grandes longueurs vs leur diamètre ⇨ la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques le long des ouvrages est limitée et la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est privilégiée par rapport à celle par les ouvrages de stockage.
Sous fonction : Préserver les caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés contribuant à la sûreté après fermeture	• dimensionnement thermique des quartiers de stockage qui permet de rester dans un domaine de température couvert par l'état des connaissances et compatible avec la capacité à rendre compte des phénomènes et de leurs couplages ; • dimensionnement thermo hydraulique et mécanique « THM » du quartier de stockage préservant les caractéristiques favorables du Callovo-Oxfordien ; • choix de matériaux des composants ouvragés « compatibles » avec les caractéristiques du Callovo-Oxfordien, afin de limiter les interactions physico-chimiques en tant que de besoin, en particulier pour favoriser leur durabilité et préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien ; • dispositions restrictives en matière de co-stockage des déchets MA-VL. Une catégorisation des déchets MA-VL en sept familles qui permet l'identification des familles de déchets susceptibles d'être placées dans un même alvéole ; • orientation des alvéoles suivant la contrainte principale *in situ* ce qui permet de limiter l'extension verticale de l'endommagement de la couche du Callovo-Oxfordien au pourtour des alvéoles ; • site d'implantation des ouvrages de stockage dans une région géologique, le Bassin parisien, de très faible sismicité et dans une zone au sein de cette région à l'écart des grandes failles de la région ; • limitation des vides dans les alvéoles de stockage.

[12] D'ordre de 200 mètres selon le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47).

[13] *A minima* sur 500 ans

5.3 Incidences résiduelles

L'évaluation des incidences résiduelles sur la santé humaine consiste à évaluer quantitativement le niveau de protection offert par le système de stockage vis-à-vis des quelques radionucléides et substances toxiques chimiques qui parviendraient éventuellement jusqu' à un exutoire (point d'extraction d'eau) accessible à l'homme et qui en ferait usage pour ses activités (eau de boisson, irrigation, abreuvement des animaux...).

5.3.1 Démarche générale d'évaluation de la sûreté après fermeture

5.3.1.1 Une démarche encadrée par le guide de sûreté n° 1 de l'ASN et cohérente avec les pratiques internationales

La démarche mise en œuvre pour mener l'évaluation de sûreté après fermeture suit les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47). Ce guide émet en effet un certain nombre de principes et recommandations qui encadrent l'évaluation de la sûreté après fermeture en fixant notamment les objectifs de cette évaluation.

Cette démarche de sûreté s'appuie également sur un retour d'expérience important lié aux différents dossiers de l'Andra sur le projet de stockage géologique (« Dossier 2005 » (49), rapport « Étape 2009 » (50-53), « Dossier d'options de sûreté » en 2016 (54, 55)) et aux échanges multiples menés depuis les années 90, dans le cadre d'exercices internationaux, en particulier de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) ou de la Commission européenne. L'Andra a pu ainsi se comparer régulièrement à ses homologues, asseoir sa démarche d'évaluation de sûreté après fermeture et s'assurer que sa mise en œuvre est cohérente avec les bonnes pratiques et référentiels internationaux.

L'Andra a ainsi participé à plusieurs ateliers de travail avec des experts internationaux sur les scénarios de sûreté dont celui de 2015, sous l'égide de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), qui a lui permis de conforter sa démarche en matière de développement et définition des scénarios de sûreté après fermeture.

En cohérence avec les objectifs et principes précités, l'Andra a structuré sa démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture suivant une approche itérative entre la conception (incluant la définition des fonctions de sûreté et exigences associées), les connaissances scientifiques et technologiques, et les évaluations de sûreté.

En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN, la démarche d'évaluation de la sûreté après-fermeture conduit à :

- vérifier le caractère favorable, pour la sûreté après fermeture, des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, composants naturels) puis dans leur ensemble ;
- vérifier la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs composants participants à la réalisation des fonctions de sûreté (composants naturels ou composants ouvragés) ;
- évaluer les risques sanitaires associés aux substances radioactives et toxiques chimiques présents dans les déchets et examiner leur conformité aux objectifs définis dans les textes en vigueur.

Ceci est obtenu par le développement de scénarios, leur quantification et les enseignements que l'on peut en tirer. Pour ce faire, la démarche d'évaluation de sûreté s'organise en plusieurs étapes (cf. Figure 5-3) :

- l'identification et la définition de scénarios à quantifier pour les évaluations de sûreté après fermeture :
  - ✓ c'est par une analyse qualitative des risques et incertitudes que sont identifiés et définis les scénarios de sûreté après fermeture ;
  - ✓ à l'issue de cette analyse, une liste de scénarios est établie pour mener les évaluations de sûreté quantitatives. Elle comprend le scénario d'évolution normale (situations de référence et enveloppe) et les scénarios de déviation de cette évolution normale. Sur la base de l'analyse et du socle de connaissances scientifiques et technologiques, les hypothèses, les modèles de représentation du scénario (composants, substances radioactives et toxiques chimiques, processus phénoménologiques...) et les valeurs des paramètres des modèles sont définis pour chacun des scénarios.
- l'évaluation quantitative des scénarios précédemment identifiés :
  - ✓ sur la base de la description du scénario, une première étape dite de conceptualisation est menée pour représenter l'ensemble des échelles spatiales à considérer, les différents compartiments (colis de stockage, ouvrages souterrains dont les alvéoles de stockage et les scellements, couche du Callovo-Oxfordien, autres formations géologiques...), et les processus phénoménologiques retenus ;
  - ✓ l'évaluation quantitative est ensuite menée à l'aide d'outils numériques capables de simuler et de quantifier le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques par les colis, leur migration dans les ouvrages souterrains, dans la couche du Callovo-Oxfordien puis les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires[14]. Ces outils font l'objet d'une démarche de qualification permettant de s'assurer de leur utilisation pertinente, notamment en termes d'analyse des résultats, en particulier sur le plan numérique, par exemple au travers d'exercices d'inter-comparaisons de codes de calcul.
- l'analyse des résultats et la définition des enseignements qui en sont tirés au regard des objectifs de protection à long terme et des performances du système de stockage ainsi que de sa robustesse :
  - ✓ l'évaluation quantitative d'un ensemble d'indicateurs permet ainsi de porter un jugement sur la réalisation des fonctions de sûreté du système de stockage et sur la robustesse d'ensemble de ce système et de vérifier que la sûreté après fermeture est toujours maîtrisée et que la protection de l'homme et de l'environnement est respectée. Elle permet aussi au travers notamment des scénarios de dysfonctionnement d'analyser les poids relatifs de certains composants ouvragés sur les fonctions de sûreté, et la sûreté globale du système de stockage.

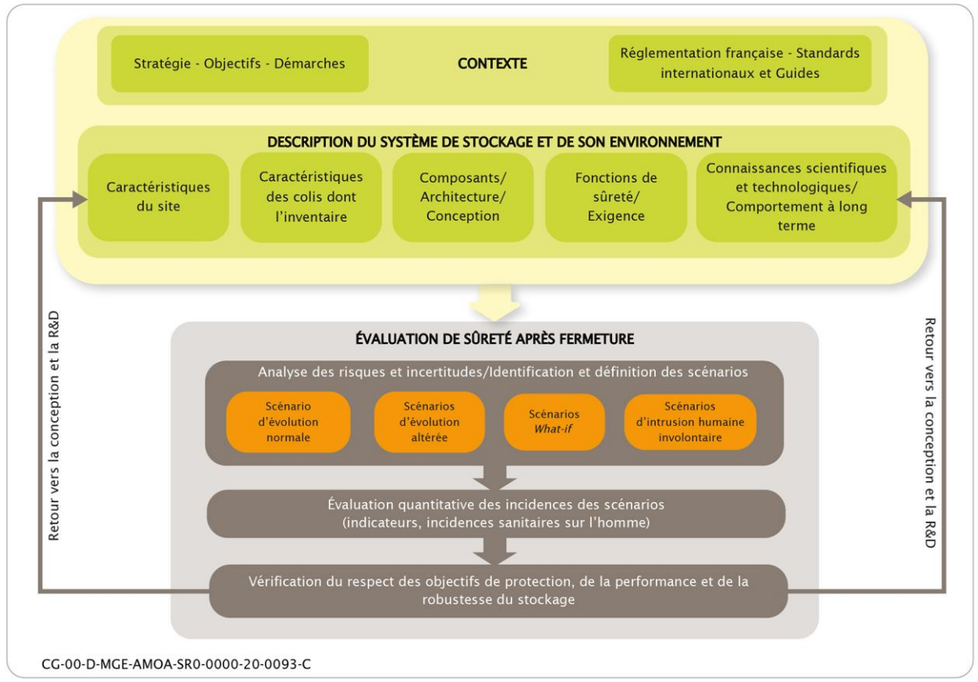


Figure 5-3 *Schéma illustratif des étapes de la démarche d'évaluation de sûreté après fermeture*

[14] La notion d'exutoire renvoie au lieu où une eau contenant potentiellement des radionucléides et des substances toxiques chimiques en solution pourrait venir au contact de la biosphère et être utilisée par l'homme.

L'évaluation de sûreté après fermeture

La démarche d'évaluation de la sûreté après fermeture s'organise selon plusieurs étapes clés :

- l'identification et la définition de scénarios de sûreté après fermeture, notamment par une analyse des risques et incertitudes résiduelles de connaissances scientifiques et technologiques ;
- l'évaluation quantitative des scénarios identifiés, à l'aide d'indicateurs de performance et de critères d'incidence sanitaire sur l'homme ;
- l'analyse des résultats des évaluations quantitatives des scénarios qui permet de porter un jugement sur :
  - ✓ le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage. Elle permet également de vérifier les dispositions de conception prises pour gérer des incertitudes ;
  - ✓ le niveau de protection de l'installation par rapport aux critères de protection définis.
- les enseignements issus des évaluations, pouvant conduire à un retour sur des itérations futures de sureté/conception/connaissances.

5.3.1.2 Les scénarios de sûreté après fermeture

Les scénarios de sûreté après fermeture sont définis pour représenter la manière dont les radionucléides et les substances toxiques chimiques contenus dans les déchets sont susceptibles d'arriver jusqu'à l'homme.

La nomenclature et la catégorisation des scénarios après-fermeture, retenues par l'Andra, correspondent aux quatre classes de scénarios génériques ressortant d'une part des préconisations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47) et d'autre part du partage à l'international, en particulier lors d'un *workshop* scénario de 2015 organisé par l'OCDE/AEN (56). Ces classes de scénarios sont (cf. Figure 5-4) :

- **un scénario d'évolution normale (SEN)** qui vise à représenter le système de stockage tel que conçu par le concepteur, considérant que toutes les fonctions de sûreté après fermeture sont réalisées et tirant partie de l'état de la connaissance scientifique et technologique sur le système de stockage, en particulier les comportements du Callovo-Oxfordien et des composants du stockage à long terme une fois fermé et en tenant compte d'événements et processus « certains ou très probables ». Il vise à vérifier le bon fonctionnement du stockage dans le temps ;
- **un ensemble de scénarios qui permet de couvrir différentes déviations de cette évolution normale** :
  - ✓ des scénarios « d'évolution altérée » représentatifs d'événements ou processus jugés peu vraisemblables au regard de l'état de la connaissance scientifique et technologique. Se rangent dans cette classe, les scénarios correspondant à des pertes de fonctions des composants du système de stockage (exemple des scellements) ;
  - ✓ des scénarios qualifiés de « *What-if* [15]» 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 et de montrer la robustesse du système de stockage dans sa globalité ;
  - ✓ des scénarios d'intrusion humaine involontaire, nommés SIHI, dans la zone d'implantation des ouvrages de stockage, par méconnaissance de son existence[16][17].

Le scénario d'évolution normale est défini en s'appuyant sur la connaissance scientifique et technologique acquise à date. En cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN, ce scénario est représenté par une situation de référence comprenant les événements les plus probables et se fondant sur le meilleur état des connaissances scientifique et technologique disponible issu notamment des recherches menées depuis plus de 25 ans. De manière prudente, cette situation de référence intègre néanmoins des représentations conservatives, comme par exemple (i) la considération d'un état saturé en eau des ouvrages dès la fermeture de l'installation souterraine sans prendre en compte le transitoire de resaturation de ces ouvrages qui peut durer quelques milliers d'années du fait de la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien, et (ii) une représentation des exutoires par pompage visant à capter de manière conservative, la totalité du flux de solutés arrivant dans la zone et non la quantité et la concentration locale autour du pompage.

Une autre situation du scénario d'évolution normale (situation enveloppe) et les autres scénarios (SEA, *What-if*) sont définis afin de démontrer la robustesse de la démonstration de sûreté après fermeture vis-à-vis de la conception du stockage et des incertitudes de connaissances résiduelles :

- une situation « enveloppe » du SEN qui repose sur les exigences applicables (par exemple l'exigence de 50 mètres de Callovo-Oxfordien sain (*e.g.* Non mécaniquement endommagé au pourtour des ouvrages souterrains) de part et d'autre du stockage) et qui cumule des valeurs de paramètres et hypothèses conservatives, notamment pour représenter la couche du Callovo-Oxfordien.

  Cette représentation majore le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'aux exutoires puis à l'homme. Elle constitue par ce choix d'hypothèses et de données conservatives, la limite du domaine d'évolution normale du système de stockage et de son environnement. Elle conduit par cette définition à une borne supérieure de l'impact cumulé des incertitudes résiduelles de connaissance en évolution normale ;
- des scénarios de déviation de l'évolution normale, que l'on qualifie de scénarios d'évolution altérée (SEA), de scénarios « *What-if* », ou de scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI).

  Ces scénarios visent à tester la robustesse du système de stockage à une perte ou une dégradation d'une fonction de sûreté fondamentale de ce dernier, même si cette perte ou dégradation est considérée comme peu ou très peu vraisemblable. Il s'agit par exemple de la défaillance postulée de tous les colis ou de tous les scellements ou encore d'une intrusion humaine involontaire dans le stockage par un forage en cas d'oubli de l'existence de ce dernier sur le long terme.

[15] Terminologie anglaise signifiant « Et si » communément retenue au plan national et international.
[16] Pour rappel, le guide de sûreté n° 1 de l'ASN fixe la date d'oubli de l'existence du stockage à 500 ans (47).
[17] Pour rappel, conformément au guide de sûreté n° 1 de l'ASN, le site géologique d'implantation du stockage ne comporte pas de ressources naturelles exceptionnelles qui conduiraient à favoriser une intrusion humaine. De même, la conception du stockage repose sur l'emploi de matériaux, par exemple aciers et béton, qui par leur nature ou leur quantité, ne constitueraient pas une ressource exceptionnelle.

Les scénarios de sûreté après fermeture

Les scénarios après fermeture décrivent l'ensemble des conditions et des voies de transfert susceptibles d'être empruntées par les radionucléides et substances toxiques chimiques relâchés par les colis de déchets hors du stockage et jusqu'à l'homme. Ils sont classés en quatre grandes catégories :

- le scénario d'évolution normale (situations de référence et enveloppe) ;
- les scénarios d'évolution altérée ;
- les scénarios « *What-if* » ;
- les scénarios d'intrusion humaine involontaire (nommés « SIHI »).

Ces scénarios visent à couvrir l'ensemble des possibilités, mêmes jugés très peu vraisemblables pour certaines, d'évolution du stockage et de son environnement géologique après fermeture sur le prochain million d'années, en termes de conséquences sur le relâchement des radionucléides et substances chimiques par les colis de déchets, leur migration hors du stockage, leur migration dans la couche du Callovo-Oxfordien, puis hors de cette couche jusqu'à des exutoires (environnement et homme).

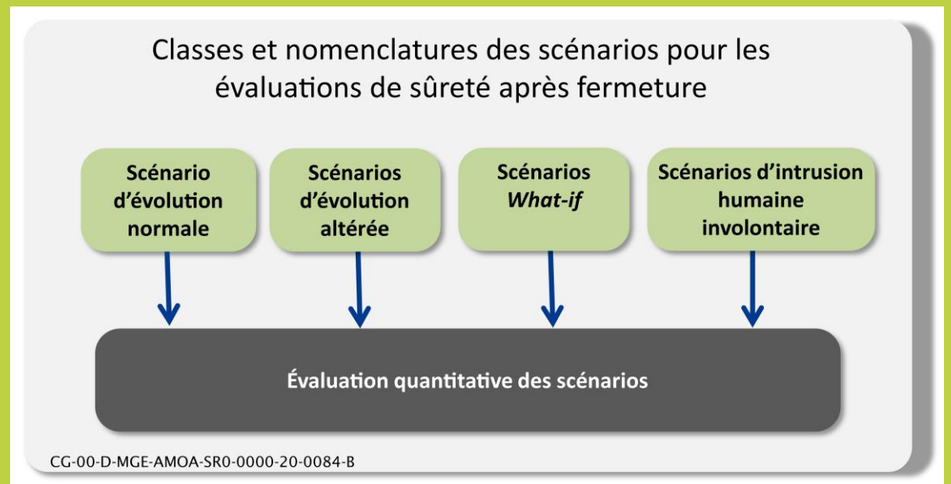


Figure 5-4 *Schéma illustratif des classes et nomenclatures des scénarios de sûreté après fermeture*

5.3.1.3 Les objectifs de protection

La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée vis-à-vis des risques liés à la dissémination de radionucléides et de toxiques chimiques (cf. Guide de sûreté n° 1 de l'ASN 2008 (47) et standards de sûreté de l'AIEA, en particulier le SSR-5 (57)).

5.3.1.3.1 Les objectifs de radioprotection

L'appréciation de l'incidence sur l'homme d'un éventuel transfert des radionucléides vers la biosphère se fonde sur l'évaluation des incidences exprimées en termes de dose, en cohérence avec le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47) qui indique :

- pour le scénario d'évolution normale, les doses efficaces individuelles calculées ne devront pas excéder la valeur de 0,25 mSv.an^{-1} pour des expositions prolongées liées à des événements certains ou très probables.

  Au-delà de cette période (10 000 ans), les incertitudes sur l'évolution de l'environnement du système de stockage augmentent progressivement. Des estimations quantifiées majorantes des expositions individuelles devront néanmoins être faites, éventuellement complétées par des appréciations qualitatives des résultats de ces estimations compte tenu des facteurs d'évolution du milieu géologique, de façon à vérifier que le relâchement des radionucléides ne conduit pas à des doses inacceptables. Lors de cette vérification, la valeur de 0,25 mSv.an^{-1} précédemment citée est conservée comme référence ;
- pour les autres scénarios, les expositions individuelles associées doivent être maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

5.3.1.3.2 Les objectifs de protection vis-à-vis des substances toxiques chimiques

Vis-à-vis des risques non radiologiques, pour la période long terme après-fermeture, ce sont les incidences liées aux substances toxiques chimiques en tant qu'accompagnant des radionucléides contenus dans les colis de déchets qui sont évaluées en cohérence avec les recommandations du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47).

L'Andra adopte une approche incrémentale qui se décline en plusieurs étapes qui visent à étudier des indicateurs permettant d'évaluer les inconvénients apportés par les substances chimiques présentes dans les déchets.

Cette approche conduit, sur la base d'un inventaire en toxiques chimiques présents dans les déchets, à évaluer le risque potentiel en comparant les concentrations en substances toxiques chimiques obtenues aux exutoires dans les différents compartiments « eau », « sol » et « air » aux valeurs de gestion NQ (normes réglementaires de qualité) en vigueur.

Dans le cas où ces concentrations excèdent les valeurs de gestion NQ, l'approche conduit à mener des évaluations quantitatives des risques sanitaires (EQRS) c'est-à-dire à quantifier le niveau du risque au travers des indicateurs « quotient de dangers » et « excès de risque individuel » selon une démarche similaire à celle proposée par l'Ineris (20). Ces évaluations sont réalisées pour le scénario d'évaluation normale et les scénarios d'évaluation altérée après après-fermeture.

5.3.1.4 Évaluations quantitatives des scénarios de sûreté après fermeture

L'évaluation quantitative est menée à l'aide d'outils numériques capables de simuler et de quantifier le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques par les colis, leur migration dans les ouvrages souterrains, dans la couche du Callovo-Oxfordien puis les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires. Ces outils font l'objet d'une démarche de qualification permettant de s'assurer de leur utilisation pertinente, notamment en termes d'analyse des résultats, en particulier sur le plan numérique, par exemple au travers d'exercices d'inter-comparaisons de codes de calcul.

Les méthodes d'évaluations quantitatives des scénarios sont détaillées au chapitre 8.4 du présent volume.

5.3.2 Scénarios de sûreté après fermeture retenue pour les évaluations

L'application de la démarche d'analyse des risques et incertitudes conduit au regard des connaissances scientifiques et technologiques, à l'identification des scénarios suivants.

Chaque scénario et chacune des situations du scénario d'évolution normale décrit comment les radionucléides et les substances toxiques chimiques contenus dans les déchets vont éventuellement arriver jusqu'à l'homme et l'environnement selon des hypothèses de représentation spécifiques.

Cette description considère ainsi tous les composants du stockage impliqués dans le transfert par la voie Callovo-Oxfordien ou par la voie « ouvrages » qui comprend le réseau de galeries souterraines et les liaisons surface-fond (cf. Figure 5-5).

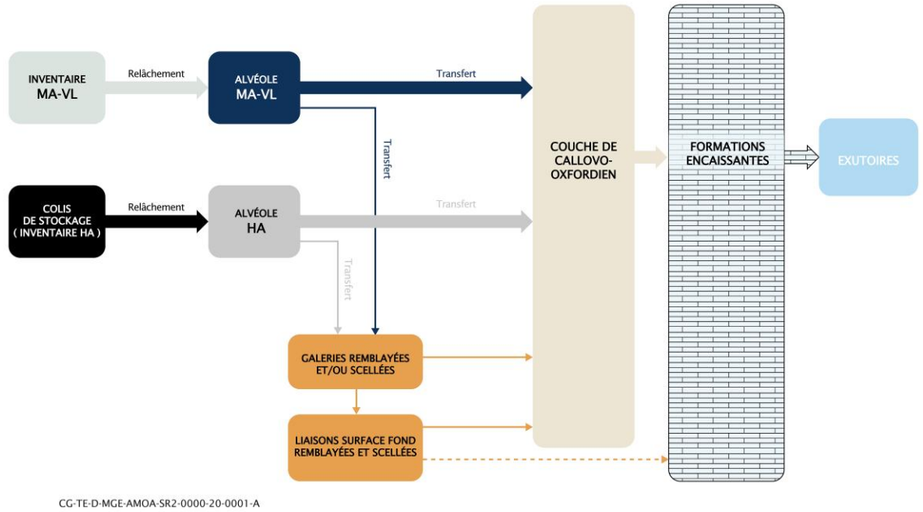


Figure 5-5 *Schéma illustratif des composants et des voies de transfert potentielles pris en compte pour du scénario d'évolution normale*

5.3.2.1 Le scénario d'évolution normale

Du fait du large panel de connaissances scientifiques et techniques acquises depuis de nombreuses années, incluant les acquis du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, l'Andra dispose d'un ensemble de données d'entrée important et robuste. Notamment, la couche du Callovo-Oxfordien, composant essentiel vis-à-vis de la sûreté sur le long terme après fermeture bénéficie d'une large connaissance établie à différentes échelles de la formation.

Les quelques incertitudes résiduelles identifiées dans le socle de connaissances scientifiques et techniques sont intégrées en scénario d'évolution normale, notamment dans la situation enveloppe. Ainsi le scénario d'évolution normale comprend deux situations définies comme suit :

- une situation de référence qui repose sur un ensemble d'hypothèses et de données dont la logique de sélection est de retenir celles qui s'appuient sur la meilleure connaissance scientifique et technique disponible.

  Dans ce scénario, le stockage est implanté selon les cotes définies pour l'architecture considérée en SEN. Les épaisseurs de garde de la couche du Callovo-Oxfordien sont estimées en conséquence à partir de l'épaisseur réelle de la couche du Callovo-Oxfordien au droit des alvéoles de stockage, en soustrayant l'extension verticale maximale de la zone de fracturation diffuse (ZFC) résultant du foisonnement au droit des alvéoles en voûte et en radier ;

- une situation enveloppe qui correspond à la prise en compte des exigences applicables au centre de stockage Cigéo (ex : épaisseur de garde de Callovo-Oxfordien…) ou des choix de sûreté conservatifs pour les composants qui ne font pas l'objet d'exigences.

  Deux positionnements du stockage sont considérés dans la couche du Callovo-Oxfordien pour prendre en compte l'exigence de 50 mètres de couche du Callovo-Oxfordien saine :

  - ✓ positionnement à 50 mètres du toit de la couche du Callovo-Oxfordien (cas 1) ;
  - ✓ positionnement à 50 mètres du mur de la couche du Callovo-Oxfordien (cas 2).

Par ailleurs, l'analyse menée depuis le « Dossier d'option de sûreté » (54, 55) sur l'état chimique du sélénium au sein des déchets vitrifiés a conduit à examiner la part de sélénium qui serait sous forme Se(+VI), c'est-à-dire sous une forme plus mobile dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien que les autres formes chimiques. Au regard des connaissances acquises et des incertitudes résiduelles, une proportion de Se(+VI) a été retenue pour les évaluations après fermeture, proportion allant jusqu'à 20 % en situation enveloppe du scénario d'évolution normale.

5.3.2.2 Les scénarios de dysfonctionnement des composants qui contribuent à la réalisation des fonctions de sûreté

Pour les composants ouvragés, l'analyse porte en particulier sur (i) les scellements de puits, descenderies et galerie, et (ii) les colis de stockage HA.

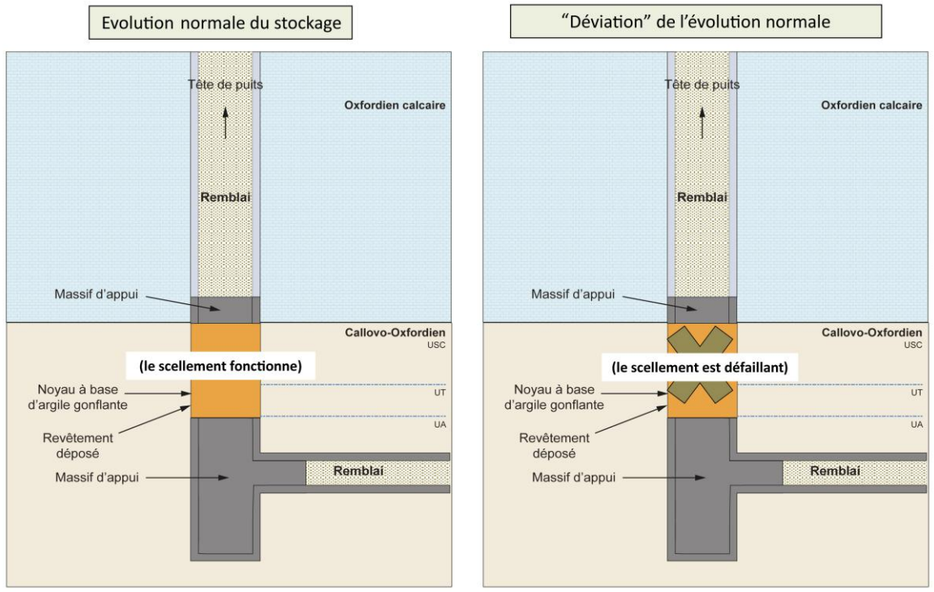
5.3.2.2.1 Les scénarios de dysfonctionnement des scellements

L'analyse des risques et incertitudes conduit à considérer :

- dans le cadre de scénario d'évolution altérée, la présence éventuelle d'une zone de fracturation connectée au droit du noyau argileux des scellements de puits et descenderies réalisés dans le Callovo-Oxfordien du fait des incertitudes résiduelles sur le comportement différé des argilites. De plus, il a été considéré un auto-colmatage imparfait des argilites du Callovo-Oxfordien endommagées mécaniquement en champ proche des scellements ce qui provoquerait un défaut de performance hydraulique. Compte tenu des causes de dysfonctionnement identifiées, le dysfonctionnement des scellements est représenté dans un scénario de déviation de l'évolution normale par une dégradation hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien et en conséquence la non-réalisation de la performance exigée des scellements.

  Trois scénarios d'évolution altérée sont considérés :

  - ✓ un SEA de dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond (puits et descenderies) par l'interface (les scellements des galeries sont opérants), (cf. Figure 5-6) ;
  - ✓ un SEA dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface (les scellements des liaisons surface-fond, puits et descenderies, sont opérants) ;
  - ✓ un SEA de dysfonctionnement de tous les scellements (des liaisons surface-fond et des galeries) par l'interface.



CG-00-D-MGE-AMOA-SR0-0000-20-0074-A

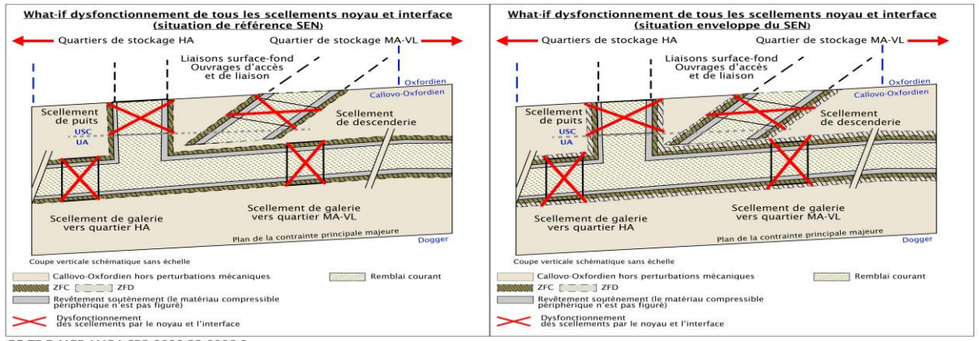
Figure 5-6 *Illustration montrant la différence entre l'évolution normale et une situation possible de défaillance de scellement pouvant induire une "déviation » de l'évolution normale*

- des scénario *What-if* de dysfonctionnement des scellements qui postulent qu'ils ne sont pas réalisés de manière conforme aux exigences applicables.

Cela conduit à représenter le noyau argileux des scellements avec des caractéristiques hydrauliques équivalentes à celle du remblai des galeries et un défaut de performance hydraulique à l'interface noyau argileux/Callovo-Oxfordien et en conséquence la non-réalisation de la performance hydraulique exigée des scellements. Cette représentation induit une forte dégradation de cette performance hydraulique des scellements donc elle affecte la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau ».

Ces scénarios visent à évaluer comment l'architecture du stockage (caractère borgne, zones de stockage séparées, longueurs de galeries…) et le Callovo-Oxfordien apportent de la robustesse et à vérifier si la voie de migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques par la couche du Callovo-Oxfordien reste majoritaire par rapport à celle par le stockage. Trois scénarios *What-if* sont postulés :

- ✓ un scénario *What-if* postulant le dysfonctionnement des scellements des puits et descenderies par le noyau argileux et l'interface ;
- ✓ un scénario *What-if* postulant le dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et l'interface ;
- ✓ un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les scellements (puits, des descenderies et galeries) par le noyau argileux et l'interface (cf. Figure 5-7).



CG-TE-D-MGE-AMOA-SR2-0000-22-0008-B

Figure 5-7 *Illustration schématique de la représentation du scénario What-if postulant le dysfonctionnement de tous les scellements par rapport aux deux situations du scénario d'évolution normale (SEN)*

5.3.2.2.2 Les scénarios de dysfonctionnement des colis de stockage HA

L'analyse des risques et incertitudes des différents composants de l'alvéole HA, en particulier le matériau de remplissage en extrados du chemisage et le conteneur de stockage HA, conduit à identifier deux scénarios d'évolution altérée et un scénario de type *What-if* :

- un SEA « dysfonctionnement d'un conteneur de stockage par alvéole HA1/HA2 » ;
- un SEA « dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage du quartier pilote HA » ;
- un scénario *What-if* de dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA, bien que cet événement soit considéré très peu vraisemblable. Ce scénario vise à vérifier la robustesse également du système de stockage et le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien.

5.3.2.2.3 Les scénarios *What-if* postulant une discontinuité non détectée dans la couche du Callovo-Oxfordien

L'analyse des risques et incertitudes conduite sur le Callovo-Oxfordien en se basant sur les connaissances scientifiques, notamment la reconnaissance par forages depuis la surface et sismique 3D ainsi que le contexte structural du site d'implantation du stockage, montre qu'une faille de rejet supérieur à deux mètres, en particulier au droit du stockage, est très peu vraisemblable.

Bien que le corpus de connaissances rende la présence d'une discontinuité verticale de rejet supérieur à deux mètres très peu vraisemblables, dans une approche prudente, deux scénarios *What-if* postulant une discontinuité non détectée sont retenus et définis de manière conventionnelle :

- un scénario *What-if* postulant une discontinuité non détectée non traversante de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- un scénario *What-if* postulant une discontinuité non détectée traversant la couche du Callovo-Oxfordien.

5.3.2.2.4 Les scénarios d'intrusion humaine involontaire

En cohérence avec les recommandations du guide de sureté n° 1 de l'ASN de 2008 (47), les scénarios d'intrusion humaine involontaire par forages retenus sont :

- un forage avec extraction de carottes visant à évaluer une exposition externe du fait d'examen visuel des carottes ;
- un forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle dans le Dogger ;

Ce scénario considère qu'un forage exploratoire du Dogger traverse le stockage puis est supposé abandonné à sa profondeur cible au Dogger.

- un forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage.

  Ce scénario postule l'abandon à la cote du stockage d'un forage destiné à l'exploitation géothermale du Trias.

- un forage interceptant un alvéole MA-VL pendant le transitoire hydraulique-gaz[18] ;

  Ce scénario considère un forage exploratoire qui intercepte un alvéole de stockage MA-VL pendant le transitoire hydraulique gaz et impacte potentiellement le foreur du fait d'un rejet de gaz et de gouttelettes d'eau contenant potentiellement des radionucléides et des substances toxiques chimiques.

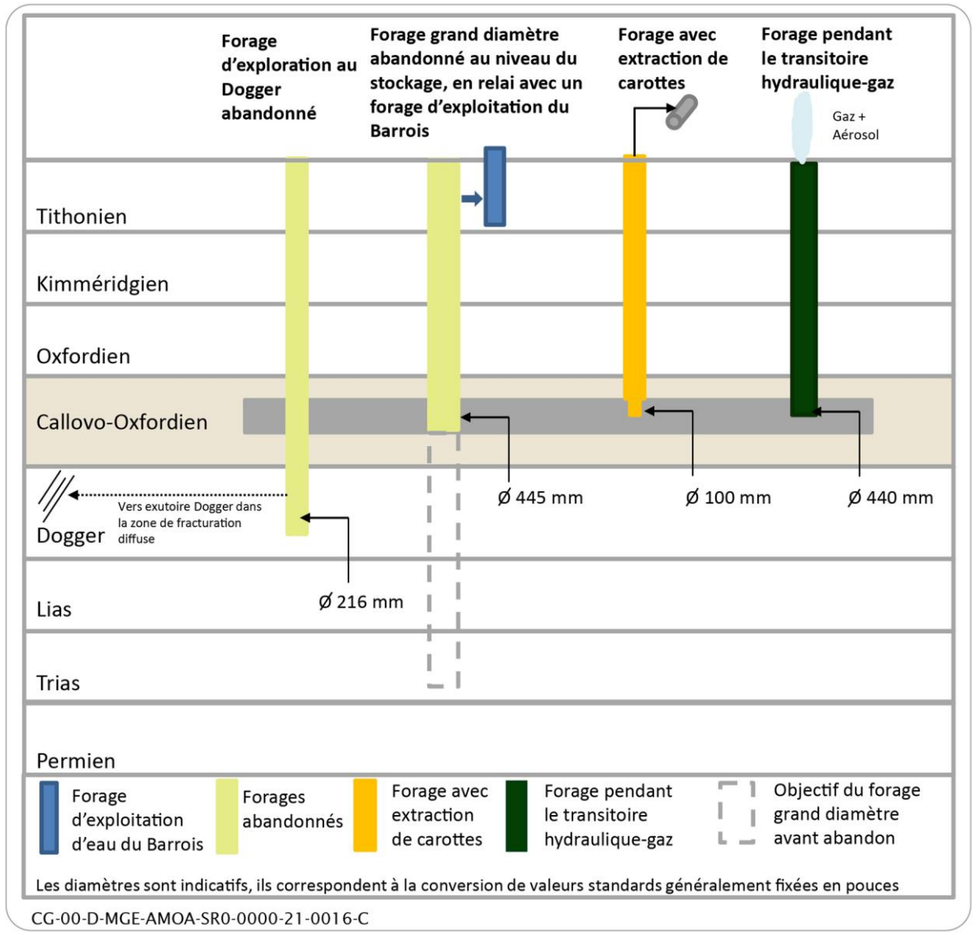


Figure 5-8 *Schéma illustratif d'intrusions humaines involontaires par forage retenues pour la sûreté après fermeture*

[18] Après sa fermeture, le stockage entre dans une phase de transitoire hydraulique-gaz, dû à sa restauration progressive par les eaux de la couche du Callovo-Oxfordien et à la production transitoire d'hydrogène principalement par corrosion en condition anoxique des composants métalliques présents dans les ouvrages.

5.3.3 Exutoires, biosphères types et groupes hypothétiques retenus pour les évaluations

5.3.3.1 Exutoires

Les exutoires (*i.e.* Points de prélèvements d'eau) considérés pour les évaluations quantitatives des incidences après fermeture sont :

- un pompage dans les Calcaires du Barrois après un transfert depuis les formations géologiques situées au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien (Oxfordien carbonaté puis Kimméridgien), exutoire n° 1 dans la figure 5-9 ;
- un pompage dans les Calcaires du Dogger après un transfert latéral sous la couche du Callovo-Oxfordien, à l'est de la zone qualifiée de fracturation diffuse, ZFD, exutoire n° 2 dans la figure 5-9 ;
- un pompage dans les Calcaires de l'Oxfordien carbonaté (*i.e.* Horizons poreux), après un transfert latéral au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien dans la zone qualifiée de fracturation diffuse (ZFD) et/ou dans les failles de la Marne, exutoire n° 3 dans la figure 5-9 ;
- un pompage dans la rivière Ornain, exutoire n° 4 dans la figure 5-9.

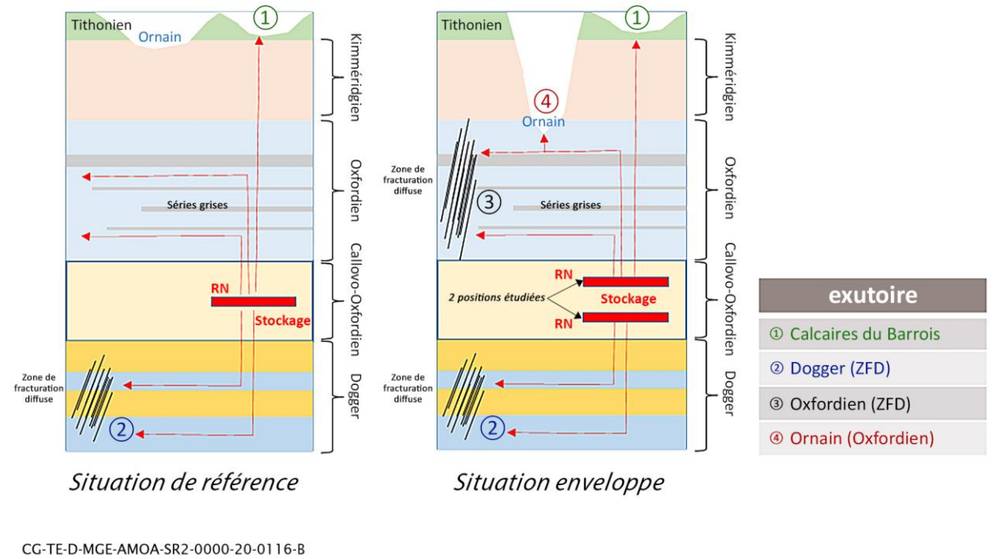


Figure 5-9 *Schéma illustratif de la localisation des exutoires (i.e. Points de prélèvement d'eau) pour les évaluations d'impact radiologique et toxicologique sur l'homme en après fermeture, avec les trajectoires associées depuis le stockage (en rouge)*

5.3.3.2 Biosphères types

Conformément au guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47) et à la démarche présentée ci-avant, les incertitudes résiduelles de connaissance liées aux évolutions de la biosphère sur le long terme considèrent différentes biosphères représentatives des types de climat qui pourraient se produire dans le futur (y compris par effet anthropique).

Leur choix repose sur des simulations qui considèrent les deux évolutions climatiques et géomorphologiques suivantes sur le prochain million d'années :

- l'évolution naturelle (climat non altéré par l'activité humaine) ;
- l'évolution considérant les effets anthropiques (climat influencé par les gaz à effet de serre).

Pour réaliser les évaluations quantitatives des scénarios après fermeture, trois biosphères types sont retenues :

- une biosphère type tempérée ;
- une biosphère chaude type subtropicale humide ;
- une biosphère froide type boréal.

5.3.3.3 Groupes de référence hypothétiques

Conformément à la démarche, pour chaque exutoire retenu, sont examinées les différentes activités possibles qui font un usage de l'eau (eau boisson, abreuvement des animaux, irrigation), susceptible de conduire à une exposition (exposition externe, exposition interne par inhalation et exposition interne par ingestion).

L'approche conduit également à examiner d'une part des comportements alimentaires moyens (groupe multi-activités) et des comportements alimentaires particuliers en lien avec une activité particulière (gros mangeur de viande bovine dans le cas d'un individu éleveur ou gros mangeur de fruits et légumes dans le cas d'un villageois avec un jardin potager par exemple). Cette approche permet de couvrir différentes sensibilités alimentaires et *in fine* de 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.

Les différents groupes de référence hypothétiques retenus pour les évaluations quantitatives pour la biosphère type tempérée sont :

- un groupe multi-activités appliqué à tous les exutoires ;
- en sensibilité :
  - ✓ un groupe (multi-activités) éleveur bovins appliqué à l'exutoire Dogger qui permet d'explorer une sensibilité alimentaire à travers une consommation plus importante de bœuf et de produits laitiers ;
  - ✓ un groupe (multi-activités) villageois jardinier appliqué à l'exutoire Dogger qui permet d'explorer une sensibilité alimentaire à travers une consommation plus importante des produits issus du verger et du jardin potager ;
  - ✓ un groupe (multi-activités) pêcheur chasseur appliqué à l'exutoire rivière Ornain qui permet d'explorer les activités de pêche en rivière et chasse de gibier.

Pour les biosphères types chaudes et froides, les régimes alimentaires des groupes de référence hypothétiques sont adaptés conformément à la démarche.

5.3.4 Les résultats des évaluations de la situation de référence de l'évolution normale de l'installation de stockage soulignent des incidences très faibles

L'évaluation de la situation de référence de l'évolution normale met ainsi en exergue le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien du fait de ses caractéristiques favorables et de l'apport des dispositions de conception de l'installation souterraine. Ces dispositions tirent parti des caractéristiques favorables de la couche du Callovo-Oxfordien (comme par exemple des alvéoles de grande longueur qui favorisent le transfert par la roche hôte, épaisseur de garde saine de la couche du Callovo-Oxfordien supérieure à 50 mètres) et en les préservant (comme par exemple en limitant la température maximale dans la roche hôte en deçà de 100 °C autour des quartiers de déchets exothermiques, comme les déchets vitrifiés de haute activité) les dispositions d'architecture et de conception favorisent le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques par la couche du Callovo-Oxfordien.

Ceci se traduit par les grands traits suivants :

- la quasi-totalité des 144 radionucléides considérés dans l'évaluation est confinée dans le stockage ou en son champ proche sur le long terme ;
- seuls les radionucléides à vie longue mobiles (*e.g.* Solubles et sans rétention, l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79) migrent depuis le stockage au sein de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'à ses extrémités, les ouvrages de stockage ne constituant pas une voie de transfert privilégiée.

  Leur transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien par diffusion dominante est néanmoins lent et limité, les temps de transfert de ces radionucléides étant supérieur à 600 000 ans.

  Ces radionucléides à vie longue, mobile ou peu sorbés, parviennent aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien, mais avec des débits molaires et en quantité très faibles dans le temps. À titre d'exemple, à un million d'années, au plus de 20 % de l'inventaire initial en iode 129 parvient aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Figure 5-10).

  Seuls ces trois radionucléides mobiles à vie longue parviennent donc aux exutoires sur le million d'années, mais *de facto* de manière lente et très atténuée.

En termes d'indicateur de dose à l'homme, la dose maximale atteinte, après plus de 600 000 ans, est de l'ordre de 0,0015 mSv.an^{-1}, donc très inférieure à la valeur de référence de 0,25 mSv.an^{-1} citée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47).

S'agissant des substances toxiques chimiques, leur migration est également très atténuée et seules les quelques substances mobiles comme le sélénium parviennent aux exutoires. Les concentrations maximales obtenues sont très inférieures aux normes réglementaires de qualité (NQ).

Les évaluations réalisées sur la base des meilleures connaissances disponibles confirment donc la bonne performance du système de stockage et des incidences sanitaires très inférieures aux valeurs de références fixées par le guide de sûreté n° 1 de l'ASN.

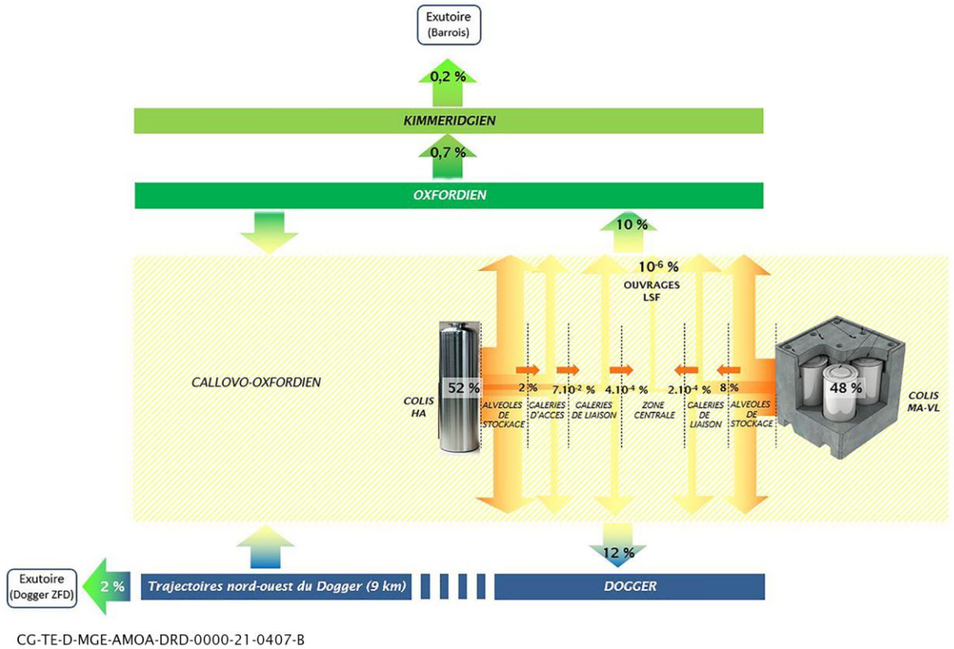


Figure 5-10 *Scénario d'évolution normale – situation de référence, quartiers de stockage HA et MA-VL, iode 129 : bilan (%) de la répartition des voies de transfert dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis les colis jusqu'aux exutoires à million d'années par rapport à l'inventaire total initial (HA + MA-VL)*

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

Les évaluations quantitatives de la situation de référence du scénario d'évolution normale fondées sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques solide acquis sur plus d'une vingtaine d'années tant en France qu'à l'étranger permettent de vérifier la performance du système de stockage dans son ensemble tel que conçu et en tenant compte de son évolution sur le long terme.

Elles soulignent ainsi la capacité de confinement de la majorité des radionucléides et de limitation de la migration de ceux mobiles à vie longue, par le système de stockage, en particulier le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien. Les incidences radiologiques sont très faibles, de l'ordre de 0,0015 $mSv.an^{-1}$, donc très inférieure à la valeur de référence de 0,25 $mSv.an^{-1}$ citée dans le guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47), et correspondent à des temps caractéristiques de l'ordre de 600 000 ans. L'ensemble est conforme avec le principe du stockage géologique qui vise à assurer la protection de l'homme et de l'environnement sur le long terme.

5.3.5 Les résultats des évaluations des autres situations et scénarios soulignent la robustesse du stockage

5.3.5.1 Les résultats de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale

La situation enveloppe du scénario d'évolution normale constitue, du fait des cumuls de conservatismes sur toute la chaîne de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à l'homme et l'environnement, une estimation quantifiée majorante des expositions individuelles permettant de couvrir de façon enveloppe les incertitudes résiduelles de connaissances.

Toutefois, même en considérant de telles hypothèses, la couche du Callovo-Oxfordien continue de jouer un rôle central, renforcé par la conception du stockage précitée, et le système de stockage continue de garantir la sûreté, comme souligné par les grands traits suivants :

- la grande majorité des radionucléides reste toujours confinée dans les ouvrages de stockage ou dans le Callovo-Oxfordien en champ proche de ces ouvrages ;
- les quelques radionucléides qui migrent depuis le stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien sont globalement identiques à ceux de la situation de référence (l'iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79). Leur migration se fait toujours par diffusion dominante ; 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, mais les débits molaires dans le temps restent faibles et à un million d'années, la fraction de la quantité initiale de ces radionucléides qui est sortie de la couche du Callovo-Oxfordien reste limitée ;
- 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 (NQ).

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.

En effet, les incidences sur la santé des personnes restent très inférieures à la valeur de référence du guide de sûreté n° 1 de l'ASN (47) (elles sont de l'ordre de grandeur de cette valeur pour un des exutoires « Pompage dans l'Oxfordien » (pour une classe d'âge dans le cas d'une biosphère chaude)) dans la majorité des exutoires et biosphères étudiés. Les risques radiologique et liés aux substances toxiques chimiques peuvent être écartés, et ce même en cumulant les conservatismes afin de majorer les transferts des solutés dans la situation enveloppe du SEN.

5.3.5.2 Les résultats des scénarios de déviation de l'évolution normale du système de stockage

La démonstration de la robustesse du système de stockage est renforcée par les résultats des scénarios de déviation de l'évolution normale du système de stockage et de son environnement, ce d'autant que ces scénarios ont traité les deux situations notamment la situation enveloppe fondée sur les caractéristiques (enveloppes) de la couche du Callovo-Oxfordien :

- des scénarios de dysfonctionnement des scellements des ouvrages ;
- des scénarios de dysfonctionnement des conteneurs de stockage HA ;
- des scénarios d'intrusion humaine involontaires après perte de connaissance de l'existence de l'installation ;
- un scénario postulant une discontinuité non détectée dans le Callovo-Oxfordien.

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 du même ordre de grandeur que celle du scénario d'évolution normale.

Dans tous les cas pour les scénarios SEA, *What-if*, SIHI, 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 SEN (0,25 mSv/an).

Ainsi à titre d'exemples illustratifs :

- en cas de dysfonctionnement des scellements par l'interface (SEA) ou par le noyau et par l'interface (*What-if*), la couche du Callovo-Oxfordien reste la voie prépondérante de migration des substances radioactives dans la plupart des cas.

  La faible perméabilité du Callovo-Oxfordien limite *de facto* les flux d'eau dans le stockage (à titre d'exemple le flux d'eau total drainé par le stockage est au maximum de quelques m^3 par an). Ces flux ne constituent donc pas un vecteur de transfert des radionucléides très important, de sorte que les longueurs de galerie de quelques centaines de mètres depuis les alvéoles jusqu'aux liaisons surface-fond permettent une atténuation de la quantité de radionucléides qui migrent dans les galeries, par effet de transfert vers le Callovo-Oxfordien. À cela, s'ajoute pour les colis de déchets HA, le positionnement du quartier de stockage HA en aval hydraulique des écoulements dans l'Oxfordien carbonaté par rapport aux liaisons surface-fond qui accentue la limitation des flux d'eau dans les galeries vers les liaisons surface-fond et l'effet de transfert des radionucléides par diffusion depuis les galeries vers le Callovo-Oxfordien.

  Seul le cas « extrême » du scénario *What-if* reposant sur la situation enveloppe postulant le dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau et par l'interface conduisent à une voie de transfert co-dominante entre celle par le Callovo-Oxfordien et celle par les ouvrages ; cette codominance est néanmoins à relativiser dans la mesure où son occurrence intervient pendant le transitoire hydraulique gaz, et que les évaluations de sûreté sont menées en considérant des conditions saturées du stockage dès le début de la fermeture définitive ;
- en cas de perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA, celle-ci entrainerait un relâchement prématuré des radionucléides et des substances toxiques chimiques. Toutefois, le Callovo-Oxfordien permet de toujours limiter la migration des radionucléides. La perte d'étanchéité prématurée des conteneurs de stockage HA se traduit uniquement par une date d'occurrence des débits molaires maximaux des radionucléides mobiles à vie longue aux extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien légèrement avancée par rapport à celle du scénario d'évolution normal, mais ces débits molaires maximaux restent similaires à ceux du scénario d'évolution normale. Ainsi *in fine*, la quantité de radionucléides mobiles à vie longue arrivant aux exutoires sur le prochain million d'années et les incidences en termes d'exposition humaine sont similaires à celles du scénario d'évolution normale ;
- une éventuelle discontinuité qui n'aurait pas été détectée pourrait constituer une voie de transfert préférentielle pour les radionucléides mobilisables. Cependant du fait de la faible perméabilité de la couche du Callovo-Oxfordien, et considérant une conductivité hydraulique représentative de matériaux argileux remaniés, l'influence de la discontinuité dans le stockage resterait très limitée, à la fois en termes d'hydraulique et de transfert des solutés. Ainsi, la quasi-totalité des radionucléides contenus dans le stockage ne « verrait » pas la discontinuité ; l'impact sanitaire sur l'homme resterait uniquement lié aux quelques radionucléides mobiles à vie longue comme pour les autres scénarios et resterait très inférieur aux objectifs de protection fixés par le guide n° 1 de l'ASN (47) ;
- pour les mêmes raisons que celles indiquées pour une éventuelle discontinuité, les intrusions humaines involontaires, même pour le cas le plus pénalisant correspondant à un forage de grande profondeur atteignant l'installation de stockage puis abandonné, ont un impact inférieur aux objectifs de protection fixés par le guide de sûreté n° 1 de l'ASN.

Les résultats des évaluations quantitatives des autres scénarios et situations que le scénario d'évolution normale de référence souligne la robustesse du stockage

Les résultats des évaluations des scénarios et situations autres que le scénario d'évolution normale de référence souligne 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 et d'incidences radiologiques sur l'homme aux exutoires et de principaux contributeurs à la dose. L'impact de la santé humaine maximale en termes de dose annuelle reste globalement du même ordre de grandeur que celle du scénario d'évolution normale.

5.3.6 Conclusion

L'évaluation de la sûreté après fermeture vise à s'assurer de manière robuste que le système de stockage (milieu naturel, en particulier la couche argileuse hôte du Callovo-Oxfordien, les composants ouvragés du stockage, en particulier les colis de déchets et les scellements, et l'architecture du stockage) garantit la protection de l'homme et de l'environnement dans le temps.

Il ressort de l'ensemble des études de l'évaluation de sûreté après fermeture que :

- la grande majorité des radionucléides restent dans le stockage ou en son champ proche ;
- seuls quelques radionucléides, ceux à vie longue et mobiles, parviennent aux extrémités de la roche hôte puis aux exutoires, mais en quantité faible et diluée dans le temps et l'espace.

Cela est le cas pour le scénario d'évolution normale, mais aussi pour les autres scénarios, qui mobilisent peu de radionucléides du fait des caractéristiques de la roche hôte du Callovo-Oxfordien, même en prenant en compte des propriétés dégradées, et de la conception du stockage. Par exemple un forage ou une fracture de la roche hôte qui intercepte un alvéole de stockage ne mobilise qu'une fraction de la quantité de radionucléides contenu dans cet alvéole.

En termes d'indicateur de dose à l'homme, pour le scénario d'évolution normal de référence, représentatif du comportement attendu du stockage, la dose maximale est de l'ordre de 0,0015 mSv/an, donc très inférieure à la valeur de référence de 0,25 mSv/an. Le scénario d'évolution normale « enveloppe » conduit à des impacts qui sont au maximum de l'ordre de grandeur de cette valeur de référence.

La démonstration de la robustesse du système de stockage est renforcée par les résultats des scénarios de déviation de l'évolution normale du système de stockage et de son environnement, ce d'autant que ces scénarios ont traité les deux situations notamment la situation enveloppe du scénario d'évolution normale qui est fondée sur les caractéristiques « enveloppes » de la couche du Callovo-Oxfordien.

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 du même ordre de grandeur que celle du scénario d'évolution normale.

Dans tous les cas pour les scénarios SEA, *What-if*, SIHI, 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 SEN (0,25 mSv/an).

L'ensemble des résultats confirment ainsi la robustesse du système de stockage face aux incertitudes résiduelles de connaissance.

6

Évaluation des incidences des situations accidentelles sur la santé humaine

6.1 Incidences sur la santé humaine des situations accidentelles de l'INB Cigéo 86

6.2 Incidences sur la santé humaine des situations accidentelles des autres risques du projet global Cigéo 94

6.1 Incidences sur la santé humaine des situations accidentelles de l'INB Cigéo

6.1.1 Démarche générale

Comme tout exploitant d'installation nucléaire de base (INB), l'Andra s'assure, dès la conception, que les dispositions techniques et organisationnelles mises en œuvre dans ses installations permettent la protection des intérêts, c'est-à-dire la protection de la sécurité, la santé et la salubrité publique 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 envisagées (normales et dégradées, incidentelles et accidentelles).

LA RADIOPROTECTION ET L'APPLICATION DU PRINCIPE ALARA

La radioprotection est la protection contre les rayonnements ionisants, c'est-à-dire l'ensemble des dispositions visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes ou sur l'environnement.

La réglementation relative à la radioprotection impose une démarche d'optimisation appelée démarche 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.

- **L'application du principe de défense en profondeur**

  Pour mémoire, conformément à l'arrêté du 7 février 2012 (41), le principe de défense en profondeur vise à se prémunir des défaillances envisagées par la mise en œuvre de niveaux de défense successifs et suffisamment indépendants (aussi appelées « barrières successives ») visant à :

  - ✓ *« prévenir les incidents ;*
  - ✓ *détecter les incidents et mettre en œuvre les actions permettant, d'une part, d'empêcher que ceux-ci ne conduisent à un accident et, d'autre part, de rétablir une situation de fonctionnement normal ou, à défaut, d'atteindre puis de maintenir l'installation dans un état sûr ;*
  - ✓ *maîtriser les accidents n'ayant pu être évités ou, à défaut, limiter leur aggravation, en reprenant la maîtrise de l'installation afin de la ramener et de la maintenir dans un état sûr ;*
  - ✓ *gérer les situations d'accident n'ayant pas pu être maîtrisées de façon à limiter les conséquences notamment pour les personnes et l'environnement.* ».

La création de l'INB impose la réalisation d'une étude de maîtrise des risques qui est jointe à la demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo (« Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Pour information » (48). Cette étude expose l'inventaire des risques que présente l'installation projetée ainsi que l'analyse des dispositions prises pour prévenir ces risques et des mesures propres à limiter la probabilité des accidents et leurs effets. Son contenu est en relation avec l'importance des dangers présentés par l'installation et de leurs effets prévisibles, en cas de sinistre, sur la sécurité, la santé et la salubrité publiques ou la protection de la nature et de l'environnement.

L'objectif de l'analyse de sûreté en exploitation est d'identifier les différentes situations auxquelles l'installation peut être confrontée, de les regrouper selon leur vraisemblance, et de vérifier que les moyens techniques et organisationnels qui en garantissent la maîtrise sont correctement dimensionnés. Ces situations couvrent le fonctionnement normal et le fonctionnement dégradé, les situations incidentelles et accidentelles de dimensionnement ainsi que des situations accidentelles plus complexes (situations d'extension du dimensionnement) pouvant être la résultante de plusieurs événements cumulés ou d'évènements climatiques extrêmes (notamment issus du retour d'expérience de l'accident de Fukushima).

La méthodologie pour la démonstration de sûreté en exploitation est présentée en détail au chapitre 5.1.3 de la « Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Pour information » du présent dossier.

Une estimation des doses reçues par l'homme et l'environnement est réalisée, à différentes distances des zones descenderie et puits de l'INB, dans les conditions météorologiques les plus défavorables et en prenant en compte des hypothèses majorantes. En vue de démontrer le caractère robuste de la démarche de sûreté, l'estimation des doses reçues par les populations et l'environnement est comparée aux objectifs de protection fixés par l'Andra qui s'appuient sur les recommandations édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) ». La méthodologie d'évaluation de l'impact sur l'homme des situations accidentelles est présentée au chapitre 8.5 du présent volume.

6.1.2 Analyse des conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement

Compte tenu de l'ensemble des lignes de défenses mises en place (cf. Chapitre 11.3.2.4 du volume IV de la présente étude d'impact), les situations accidentelles envisagées dans la démonstration de sûreté nécessitent de postuler plusieurs défaillances simultanées. Elles concernent principalement des situations de chute de colis de déchets radioactifs en cours de manutention, d'incendie à proximité de colis de déchets ou encore des situations liées à des aléas externes (ex : séisme).

Les situations accidentelles envisagées dans la démonstration de sûreté sont identifiées en fonction de leur vraisemblance.

Une synthèse des résultats de plusieurs situations accidentelles est développée dans les chapitres suivants (le détail des résultats présenté dans le chapitre 5.4 de la « Pièce EPU7 - Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » (48) du présent dossier :

- des situations accidentelles jugées plausibles mais qui ne présentent pas d'impacts radiologiques significatifs sur l'homme et l'environnement ;
  - ✓ chute d'un colis primaire à la suite de la défaillance d'un pont (cf. Chapitre 6.1.2.1 du présent volume) ;
  - ✓ incendie d'un chariot de transfert des colis dans le bâtiment nucléaire de surface (cf. Chapitre 6.1.2.2 du présent volume).
- des situations accidentelles dont la plausibilité est moindre mais qui seraient les plus sévères en termes de dose maximale sur l'homme et l'environnement (situations accidentelles sévères) :
  - ✓ chute d'un emballage ouvert de transport MA-VL lors de son déchargement dans le bâtiment nucléaire de surface (cf. Chapitre 6.1.2.3 du présent volume) ;
  - ✓ inflammation d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage (cf. Chapitre 6.1.2.4 du présent volume).

La synthèse des situations accidentelles en exploitation est présentée au chapitre 6.1.2.5 du présent volume.

Les conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement en phase de construction sont présentés au chapitre 6.1.2.6 du présent volume.

6.1.2.1 Chute d'un colis primaire à la suite de la défaillance d'un pont

Dans le cas des situations accidentelles de chute de colis de déchets, il est considéré, de manière pénalisante et indépendante de l'évènement initiateur de la chute, que la filtration du premier niveau de filtration n'est pas fonctionnelle. Le dernier niveau de filtration est quant à lui considéré fonctionnel du fait de la mise en place d'un caisson de filtration de secours.

6.1.2.1.1 Présentation de la situation accidentelle

Le déchargement des emballages de transport est réalisé au moyen d'un pont nucléarisé. Cette opération est effectuée dans la cellule de déchargement des emballages de transport une fois l'emballage de transport accosté à la cellule. Le déchargement consiste à lever au pont un colis primaire et le transférer vers une zone appropriée dans la cellule de déchargement des emballages de transport.

La présente situation accidentelle de chute se déroule lors de la phase de levage. Le colis de déchets manutentionné est situé au-dessus de l'emballage de transport ouvert. En fonction de l'emballage de transport et des colis de déchets transportés, plusieurs colis de déchets peuvent être présents dans l'emballage. Dans ces conditions, il est considéré qu'un autre colis primaire peut être présent à l'aplomb du colis de déchets manutentionné lors de la chute.

Les conséquences sont une perte de confinement du colis de déchets manutentionné et de celui situé à l'aplomb (si présent). L'activité interne des colis primaires, dont la hauteur de qualification est inférieure à la hauteur de chute, est supposée remise en suspension.

Seuls certains colis primaires de déchets MA-VL sont susceptibles de perdre leur confinement lors des opérations de levage dans cette cellule.

En effet les hauteurs de manutention sont inférieures à la hauteur de qualification des colis primaires HA et de certaines familles de colis primaires MA-VL tels que les colis CSD-C.

Cet évènement engendrerait des rejets de substances radioactives à l'environnement. Il n'entraine cependant pas de risque d'exposition interne du travailleur car aucun travailleur n'est présent en cellule lors de l'exploitation de l'installation.

Les principales dispositions de sûreté valorisées vis-à-vis de la situation accidentelle sont les suivantes :

- conception robuste de la chaîne de levage des ponts nucléarisés ;
- limitation de la vitesse et de la hauteur de manutention au strict nécessaire (*via* contrôle-commande procédé représenté par le système de conduite et le système de sécurité) ;
- balise de contamination atmosphérique en temps réel ;
- présence d'un second système de confinement avec maintien de son intégrité en cas de chute. La cellule concernée par cette situation est classée C4** Famille IIIB au sens de la norme NF ISO 17873 de 2006 (58).

6.1.2.1.2 Hypothèses de la situation accidentelle

Les hypothèses considérées sont les suivantes :

- terme source retenu dans les évaluations des conséquences correspondant au colis MA-VL dont l'activité radiologique disséminée suite à une perte de confinement de celui-ci en cas de chute est la plus sévère compte tenu de l'activité des radionucléides contenus et de la fraction d'activité mobilisable du colis ;
- facteur de filtration[19] : 10^{-3} ;
- hauteur de rejet : 30 mètres (rejets à la cheminée du bâtiment nucléaire de surface EP1).

6.1.2.1.3 Impacts radiologiques de la situation accidentelle sur le public

Les impacts radiologiques maximaux au public sont inférieurs à 50 µSv pour l'enfant de 1 an à Saudron sur une durée d'exposition de 70 ans.

6.1.2.1.4 Impacts non radiologiques de la situation accidentelle sur le public

Les concentrations de substances toxiques chimiques maximales auxquelles serait exposé le public (habitant de Saudron et le promeneur à 500 mètres de l'émissaire) sont inférieures aux indicateurs de risque chimique avec au moins six ordres de grandeur.

[19] Seul le filtre THE du dernier niveau de filtration est valorisé dans ce scénario. Ainsi, de manière pénalisante, le filtre THE du premier niveau de filtration n'est pas retenu pour l'évaluation des impacts à la population.

6.1.2.2 Incendie d'un chariot de transfert des colis dans le bâtiment nucléaire de surface

Les situations accidentelles d'incendie intègrent, de manière pénalisante et indépendante de l'évènement déclencheur de l'incendie, la défaillance du système d'extinction.

6.1.2.2.1 Présentation de la situation accidentelle

En vue de la confection des colis de stockage ou du transfert des colis de stockage pour leur mise en hotte par exemple, des opérations de transfert au sol sont réalisées. Ces transferts de colis sont effectués au moyen d'un chariot de transfert des colis ou d'un transbordeur (transférant le chariot de transfert des colis).

Lors des opérations de transfert de colis au moyen d'un chariot de transfert des colis au sein du bâtiment nucléaire de surface EP1, un incendie du chariot est envisagé.

La situation accidentelle retenue concerne un départ de feu sur équipement du chariot dans la zone tampon principale des colis de stockage. Le système d'extinction embarqué sur le chariot est considéré inopérant. Les températures atteintes dans cette situation d'incendie ne remettent pas en cause la première barrière de confinement statique des déchets. Ainsi, les conséquences se limitent à une remise en suspension de la contamination labile du colis en cours de transfert ainsi que de colis potentiellement situés à proximité.

Il est considéré qu'un total de cinq colis de stockage contenant des colis primaires est concerné par la présente situation accidentelle.

Cet évènement engendrerait des rejets de substances radioactives à l'environnement.

Les principales de sûreté valorisées vis-à-vis de la situation accidentelle sont les suivantes :

- limitation des charges calorifiques, choix des matériaux vis-à-vis de leur réaction au feu ;
- détection automatique d'incendie ;
- résistance au feu des ouvrages et équipements (stabilité au feu R120) ;
- système d'extinction d'ambiance de type déluge ;
- zone tampon classée zone de feu et équipée d'un secteur de confinement ;
- robustesse des colis primaires à l'échauffement dû à l'incendie envisagé.

6.1.2.2.2 Hypothèses de la situation accidentelle

Les hypothèses considérées sont les suivantes :

- terme source retenu : contamination surfacique labile associée à cinq colis de stockage ayant la surface externe la plus importante (contamination surfacique labile retenue de 4 $Bq.cm^{-2}$ pour les émetteurs béta-gamma et 0,4 $Bq.cm^{-2}$ pour les émetteurs alpha, cf. Chapitre 5.3.2.1.3 de la « Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » (48) du présent dossier[20] ;
- spectre de répartition de la contamination labile :91 % en bêta gamma (pris équivalent à du ^{137}Cs) et 9 % en alpha (pris équivalent à du ^{239}Pu) ;
- fraction de remise en suspension : 1 pour le ^{137}Cs et 5.10^{-3} pour le ^{239}Pu ;
- facteur de filtration : 10^{-3} (Présence d'un secteur de confinement) ;
- taux de transfert vers le secteur de confinement :10^{-1} ;
- hauteur de rejet : 30 mètres (rejets à l'émissaire du bâtiment nucléaire de surface EP1).

6.1.2.2.3 Impacts radiologiques de la situation accidentelle sur le public

Les impacts radiologiques maximaux au public sont inférieurs à 1 µSv quelle que soit la population considérée sur une durée d'exposition de 50 ans pour l'adulte et 70 ans pour l'enfant d'un an et l'enfant de 10 ans.

[20] Le choix de retenir cinq colis correspond à un colis en cours de manutention exposé à l'incendie ainsi que quatre colis situés à proximité exposés à l'incendie.

6.1.2.3 Chute d'un emballage ouvert de transport MA-VL lors de son déchargement dans le bâtiment nucléaire de surface

Cette situation correspond à l'accident enveloppe conduisant aux doses absorbées les plus importantes autour de la zone descenderie (émissaire pour l'installation de surface au niveau de la zone descenderie, cf. Figure suivante).

6.1.2.3.1 Présentation de la situation accidentelle sévère

Lors de l'opération de descente d'un emballage de transport dépourvu de capot(s) amortisseur(s) dans la fosse du hall de déchargement des emballages de transport, une chute de l'emballage est envisagée. En complément, une défaillance du matelas amortisseur est considérée.

Dans ces conditions, compte tenu des hauteurs de manutention, il est considéré qu'à la fois l'emballage de transport et les colis primaires qu'il contient perdent leur confinement. Seuls certains colis primaires MA-VL sont susceptibles de perdre leur confinement. En effet, les hauteurs de manutention sont inférieures à la hauteur de qualification des colis primaires HA et de certaines familles de colis primaires MA-VL, tels que les CSD-C.

L'activité interne des colis primaires, dont la hauteur de qualification est inférieure à la hauteur de chute, est alors remise en suspension.

Cet évènement engendrerait des rejets de substances radioactives et toxiques chimiques à l'environnement.

Les principales dispositions de sûreté associées à cette situation accidentelle sévère sont les suivantes :

- 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 ;
- évacuation des travailleurs.

6.1.2.3.2 Hypothèses de la situation accidentelle sévère

Les hypothèses considérées sont les suivantes :

- terme source retenu dans les évaluations des conséquences correspondant aux colis MA-VL contenus dans l'emballage de transport dont l'activité radiologique disséminée, suite à une perte de confinement de ceux-ci en cas de chute, est la plus sévère compte tenu de l'activité des radionucléides contenus et de la fraction d'activité mobilisable des colis ;
- facteur de rétention de l'emballage de transport : 10^{-1} ;
- facteur de filtration : 1 (rejet *via* la ventilation de classe C1 Famille I au sens de la norme NF ISO 17873 de 2006 (58)) ;
- hauteur de rejet : 0 mètre (rejets en façade du bâtiment nucléaire de surface EP1 ou du bâtiment ETH).

En ce qui concerne l'évaluation de l'impact non radiologique, l'inventaire chimique associé à chaque compartiment du colis primaire est retenu, de manière pénalisante (déchet, matrice, enveloppe).

6.1.2.3.3 Impacts radiologiques de la situation accidentelle sur le public

Les résultats obtenus montrent que les doses absorbées par les adultes sont plus importantes que celles absorbées par les enfants.

Pour rappel, pour les situations accidentelles les plus sévères, les impacts radiologiques au public sont estimés afin d'évaluer les besoins éventuels de mesures de protection 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 de 10 mSv pour le public (cf. Chapitre 5.1.2.3.1 de la « Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Pour information » (48) du présent dossier).

Les impacts radiologiques maximaux au public sont inférieurs à 9 mSv pour l'adulte situé à 500 mètres du point de rejet sur une durée d'exposition de 24 heures (cf. Tableau 6-1 et la figure 6-1).

La dose maximale sur 24 heures reçue par le public autour de la zone descenderie est donc inférieure à l'objectif de protection fixé à 10 mSv (cf. Chapitre 8.5 du présent volume). Cet accident ne nécessite donc pas de mesures de protection du public dans le temps et dans l'espace de type mise à l'abri.

Tableau 6-1 *Dose maximale à 24 heures pour l'adulte en conditions météorologiques les plus défavorables autour de la zone descenderie pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface*

Distance au point de rejet (m)	500	1 000 Saudron	2 000	3 000	4 000	5 000
Dose à 24 h (mSv)	8,2	2,3	0,7	0,33	0,18	0,14

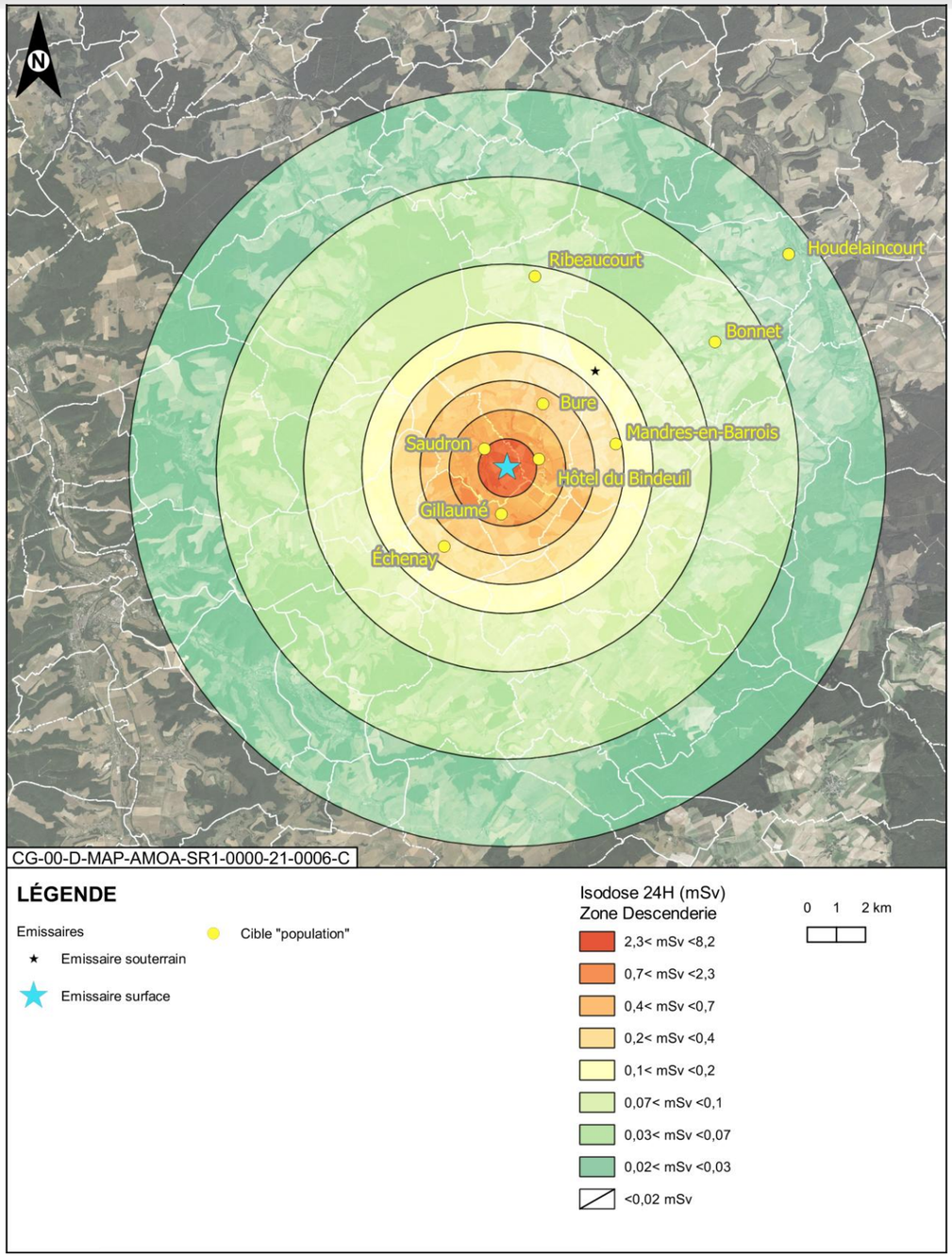


Figure 6-1 *Doses maximales autour de la zone descenderie pour l'adulte pour une exposition de 24 heures pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface*

6.1.2.3.4 Impacts non radiologiques de la situation accidentelle sur le public

Les concentrations maximales en substances toxiques chimiques auxquelles serait exposé le public (habitant de Saudron et promeneur à 500 mètres de l'émissaire) sont inférieures aux seuils des effets irréversibles pour l'homme d'au moins trois ordres de grandeur.

6.1.2.3.5 Impacts en termes de pollution radiologique des sols de la situation accidentelle

Il s'agit ici d'évaluer d'une part, la contamination des sols (*via* les dépôts surfaciques au sol) puis de s'assurer que les aliments susceptibles d'être contaminés restent conformes aux limites de commercialisation Euratom.

a) Dépôts surfaciques au sol

L'accident enveloppe conduisant aux doses les plus importantes sur la zone descenderie est le même que celui décrit précédemment mais avec des colis de déchets conduisant aux concentrations en émetteurs alpha, bêta et gamma les plus importants.

Le tableau 6-2 montre la concentration maximale en émetteurs alpha, bêta et gamma à 24 heures autour du périmètre INB de la zone descenderie dans les conditions météorologiques les plus défavorables (toujours le cas F3).

Tableau 6-2 *Concentration maximale dans le sol autour du périmètre INB de la zone descenderie pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface*

Distance	500 m	1 000 m	2 000 m	5 000 m	Radionucléides contributeurs
Émetteurs alpha (Bq/kg)	2,28	0,64	0,19	0,03	^{244}Cm, ^{238}Pu, ^{241}Am
Émetteurs bêta et gamma (Bq/kg)	179	50,5	15,2	2,99	^{60}Co, ^{63}Ni, ^{137}Cs, ^{55}Fe, ^{108m}Ag

À noter que la contamination du sol à un an est proche de celle à 24 heures et que la contamination du sol à 50 ans est très inférieure due à la décroissance du ^{60}Co.

b) Impact sur les produits agroalimentaires

La contamination des salades est ensuite évaluée et comparée aux limites de commercialisation Euratom. Les salades sont considérées comme un végétal pénalisant par sa surface foliaire importante pouvant capter la radioactivité dans l'air.

Le tableau 6-3 ci-après restitue la contamination des salades à différentes distances autour de la zone descenderie à un an et la limite de commercialisation associée.

Tableau 6-3 *Contamination des salades à un an en Bq/kg autour de la zone descenderie pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface*

Contamination des salades à un an en Bq/kg	500 m	1 000 m	2 000 m	5 000 m	Limite de commercialisation Euratom (Bq.kg^{-1})
Isotopes de périodes supérieures à 10 jours (sauf ^{3}H, ^{14}C et ^{40}K)	25,8	7,26	2,19	0,43	1 250
Isotopes du plutonium et transplutoniens émetteurs alpha	0,00015	0,00004	0,00001	0,000002	80
Isotopes du strontium	0,4	0,11	0,03	0,006	750

L'ensemble des valeurs de contamination des salades à un an sont inférieures aux limites de commercialisation Euratom et donc ne nécessite pas la mise en place de servitudes d'utilité publiques.

Les activités massiques maximales des produits agroalimentaires resteraient largement inférieures aux limites de commercialisation et l'activité massique calculée ajoutée dans le sol serait très faible.

6.1.2.3.6 Gestion de la situation accidentelle sévère

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.

6.1.2.4 Inflammation d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage

Dans le cas où l'option retenue serait de stocker des colis de déchets bitumés en l'état (cf. Chapitre 6.3 de la « Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Pour information » (48) du présent dossier), la situation étudiée correspond à l'accident enveloppe conduisant aux doses absorbées les plus importantes autour de la zone puits[21] (émissaire pour l'installation souterraine au niveau de la zone puits, puits de ventilation air vicié d'exploitation, cf. Figure 6-2).

6.1.2.4.1 Présentation de la situation accidentelle sévère

L'accident enveloppe conduisant aux doses absorbées les plus importantes autour de la zone puits est une situation accidentelle sévère d'inflammation d'un colis de déchets bitumés au sein d'un conteneur de stockage en alvéole MA-VL (scénario étudié au titre de la flexibilité, (cf. Chapitre 6.3 de la « Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Pour information » (48) du présent dossier). Il est considéré que cette situation 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.

Les colis de déchets considérés sont les colis de déchets bitumés qui conduisent aux impacts aux populations les plus élevés pour une exposition de 24 heures.

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 (en cas de colmatage des filtres par la fumée de l'incendie par exemple).

Ensuite, malgré le confinement statique assuré par les parois de l'alvéole de stockage, il est 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.

6.1.2.4.2 Hypothèses de la situation accidentelle sévère

Les principales hypothèses retenues dans le cadre de l'étude de cette situation accidentelle (cf. Figure 6-2) sont les suivantes :

- l'agression d'un colis de stockage et de tous les colis primaires qu'il contient[22] ;
- la mobilisation de la totalité de l'activité des déchets contenus dans un colis de stockage sur le temps du scénario et la prise en compte de la famille de colis enveloppe de l'ensemble des familles de déchets bitumés reçus en termes d'activité ;
- un relâchement des radionucléides limité par une rétention de 10 % de l'activité par le colisage et également de 10 % de l'activité par les parois de l'alvéole assurant le rôle de secteur feu (la rétention des substances radioactives dans les gaines de ventilation n'étant quant à elle pas considérée compte tenu de la mise en place du confinement statique de l'alvéole de stockage qui ne permet pas de valoriser la performance de la filtration de très haute efficacité présente en aval de l'alvéole) ;
- une hauteur de rejet à la cheminée du puits de ventilation d'air vicié d'exploitation de 12 mètres ;
- une exposition sur le lieu de vie situé à Bure de 24 heures.

[21] Cet impact est associé à une approche prudente consistant à considérer le mode de stockage des colis de déchets bitumés sans traitement préalable visant la neutralisation de la réactivité chimique des déchets bitumés.

[22] L'absence de conséquences sur les autres colis de stockage situés dans l'alvéole est basée sur la nature et le dimensionnement du conteneur de stockage en béton renforcé qui accueille les fûts de déchets bitumés et garantit son bon comportement à une telle situation accidentelle (épaisseur suffisante pour atténuer la propagation de chaleur à l'extérieur du conteneur de stockage, formulation béton avec des fibres polypropylène permettant de conserver son épaisseur, système de fixation du couvercle robuste, etc.).

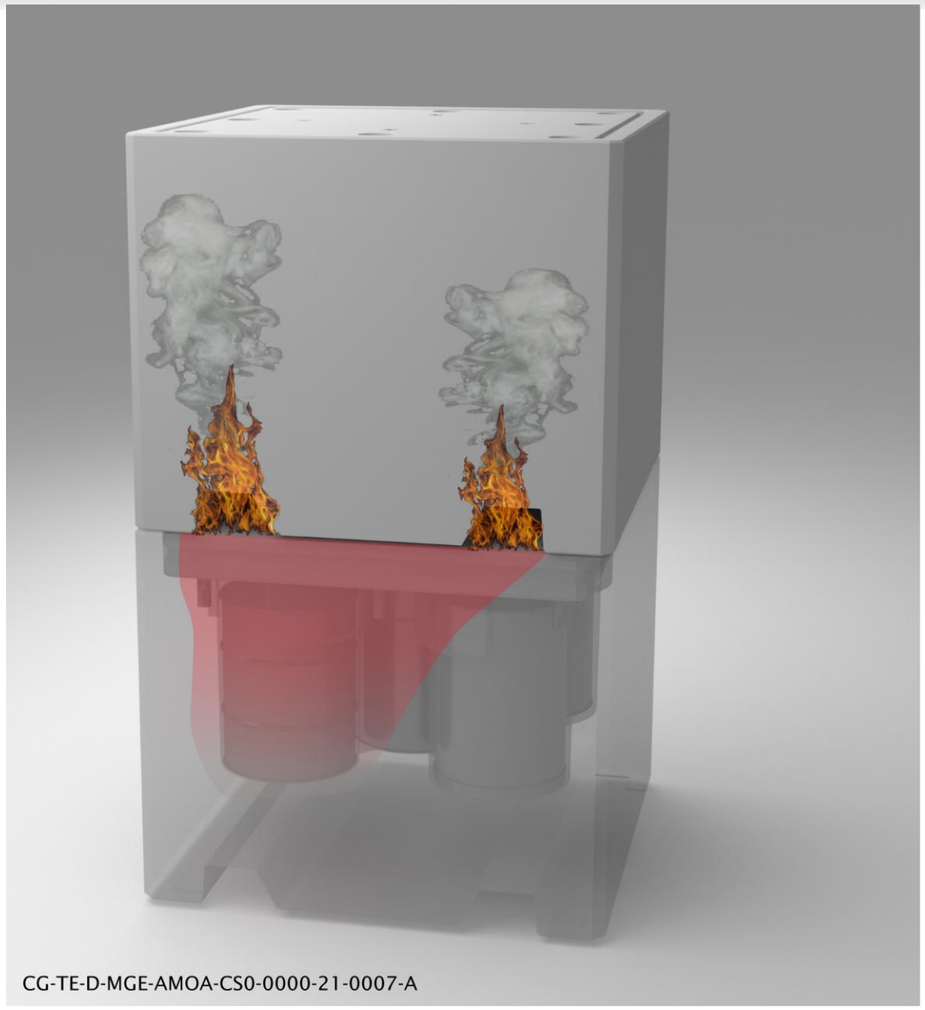


Figure 6-2 *Illustration de la situation accidentelle sévère d'inflammation d'un fût de déchets bitumés dans un colis de stockage*

6.1.2.4.3 Impacts radiologiques de la situation accidentelle sévère sur le public

Les résultats obtenus montrent que les doses absorbées par les adultes sont plus importantes que celles absorbées par les enfants.

Pour rappel, pour les situations accidentelles les plus sévères, les impacts radiologiques au public sont estimés afin d'évaluer les besoins de mesures de protection 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 de 10 mSv pour le public (cf. Chapitre 8.5.1 du présent volume).

Le tableau et la figure suivants (cf. Tableau 6-4 et figure 6-3) montrent que la dose maximale sur 24 heures reçue par le public est de l'ordre de 0,7 mSv à Bure et reste inférieure à 0,75 mSv autour de la zone puits, pour un objectif de protection fixé à 10 mSv (cf. Chapitre 8.5.1 du présent volume). Cet accident ne nécessite donc pas de mesures de protection du public dans le temps et dans l'espace de type mise à l'abri.

Tableau 6-4 *Dose maximale à 24 heures pour l'adulte en conditions météorologiques les plus défavorables autour de la zone puits pour la situation accidentelle sévère d'inflammation d'un fût de déchets bitumés dans un colis de stockage*

Distance au point de rejet (m)	500	1 000	2000 (Bure : 2120)	3 000	4 000	5 000	7 000	10 000	13 000
Dose à 24 h (mSv)	0,34	0,48	0,67	0,72	0,75	0,65	0,41	0,22	0,13

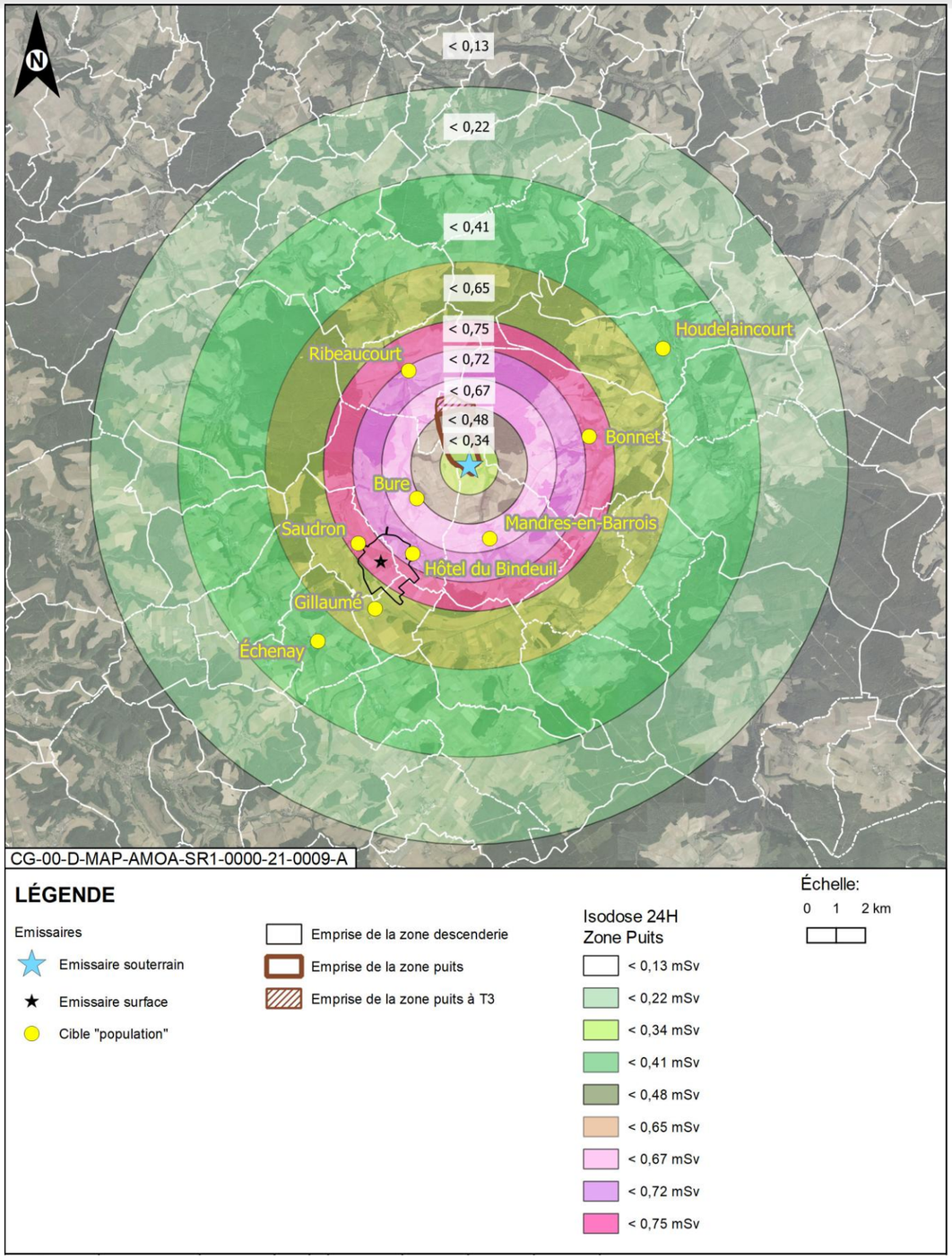


Figure 6-3 *Doses maximales autour de la zone puits pour l'adulte pour une durée d'exposition de 24 heures pour la situation accidentelle sévère d'inflammation d'un fût de déchets bitumés dans un colis de stockage*

6.1.2.4.4 Impacts en termes de pollution radiologique et chimique des sols de la situation accidentelle sévère

a) Dépôts surfaciques au sol

L'accident enveloppe conduisant aux doses les plus importantes sur la zone puits est le même que celui décrit au chapitre précédent mais avec des colis de déchets conduisant aux concentrations les plus importantes en émetteurs alpha, béta et gamma. Les conditions météorologiques les plus pénalisantes sont toujours le cas F3.

Le tableau 6-5 suivant montre la concentration maximale en émetteurs alpha, bêta et gamma à un an à plusieurs distances autour de la zone puits dans les conditions météorologiques les plus défavorables.

Tableau 6-5 *Concentration maximale dans le sol à un an en Bq/kg autour de la zone puits pour un accident enveloppe de relâchement des colis de déchets MA-VL conduisant aux concentrations en émetteurs alpha, bêta et gamma les plus importants*

Distance	500 m	1 000 m	2 000 m	3 000 m	4 000 m	5 000 m	Radionucléides contributeurs
Émetteurs alpha (Bq/kg)	0,028	0,23	0,47	0,51	0,53	0,46	Am241, Pu239
Émetteurs bêta et gamma (Bq/kg)	56	453	944	1010	1060	925	Cs137, Sr90

b) Impacts sur les produits agroalimentaires

L'évaluation de l'impact sur la contamination des salades est comparée aux limites de commercialisation Euratom. Les salades sont considérées comme un végétal pénalisant par sa surface foliaire importante pouvant capter la radioactivité dans l'air.

Le tableau 6-6 ci-après restitue la contamination des salades à différentes distances autour de la zone puits à un an (nouveau cycle végétatif) et la limite de commercialisation associée.

Tableau 6-6 *Contamination des salades à un an en Bq/Kg autour de la zone puits pour un accident enveloppe de relâchement des colis de déchets MA-VL conduisant aux concentrations en émetteurs alpha, béta et gamma les plus importants*

	500 m	1 000 m	2 000 m	3 000 m	4 000 m	5 000 m	Limite de commercialisation Euratom
Isotopes de périodes supérieures à 10 jours (sauf H3, C14 et K40)	7,93	64,1	134	144	150	131	1250
Isotopes du plutonium et transplutoniens émetteurs alpha	$5{,}13.10^{-7}$	$4{,}15.10^{-6}$	$8{,}64.10^{-6}$	$9{,}29.10^{-6}$	$9{,}71.10^{-6}$	$8{,}47.10^{-6}$	80
Isotopes du strontium	1,88	15,2	31,7	34,1	35,7	31,1	750

L'ensemble des valeurs de contamination des salades à un an sont inférieures aux limites de commercialisation Euratom et donc ne nécessite pas la mise en place de servitudes d'utilité publiques.

6.1.2.4.5 Gestion de la situation accidentelle sévère

Dès lors que l'inflammation d'un colis de déchets bitumés est suspectée *via* les dispositifs de détection incendie, plusieurs dispositions de limitation des conséquences sont disponibles et à disposition de l'exploitant afin de gérer la situation accidentelle (selon la cinétique de l'évènement et la position du conteneur de stockage concerné au sein de l'alvéole). Elles visent en particulier à limiter la propagation de l'inflammation à un autre conteneur).

Ces dispositions sont présentées en détail au chapitre 5.3.3.2.3d de la « Pièce EPU7 – Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo – Pour information » (48).

6.1.2.5 La synthèse des situations accidentelles en exploitation

L'étude des situations accidentelles a pour objectif d'analyser la robustesse de la démonstration de sûreté vis-à-vis de situations peu vraisemblables compte tenu des dispositions de sûreté mises en place en termes de prévention, de surveillance et de limitation des conséquences.

Dans l'éventualité d'un accident sur l'INB 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 dans le temps et dans l'espace de type mise à l'abri.

Le tableau 6-7 synthétise le résultat de l'analyse des situations accidentelles représentatives et sévères liées à la phase d'exploitation, par comparaison aux objectifs de protection retenus.

Tableau 6-7 Synthèse de l'évaluation des situations accidentelles et des impacts radiologiques (doses maximales) ou non radiologiques associés

Localisation	Situations accidentelles sévères	Impacts radiologiques au public	Objectifs de protection radiologique pour les situations accidentelles (pour mémoire)
Situations accidentelles			
Cellule de déchargement des emballages de transport	Chute d'un colis primaire MA-VL à la suite de la défaillance d'un pont	Inférieur à 50 µSv sur une **durée de vie entière**	**Court terme (24 h)** : dose de l'ordre du mSv
Cellule process du bâtiment nucléaire de surface EP1	Incendie d'un chariot de transfert des colis avec défaillance du système d'extinction embarqué	Inférieur à 1 µSv sur une **durée de vie entière**	**Court terme (24 h)** : dose de l'ordre du mSv
Situations accidentelles sévères			
Hall de déchargement des emballages de transport du bâtiment nucléaire de surface EP1	Chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement à la suite de la défaillance du pont de manutention sécurisé et du matelas amortisseur	Inférieur à 9 mSv sur une durée d'exposition de 24 heures	**Court terme (24 h)** : dose inférieure à 10 mSv
Alvéole de stockage MA-VL dédié aux colis de déchets bitumés stockés en l'état	Inflammation d'un fût de déchets bitumés dans un colis de stockage	Inférieur à 1 mSv sur une durée d'exposition de 24 heures	**Court terme (24 h)** : dose inférieure à 10 mSv

6.1.2.6 Analyse des conséquences des accidents éventuels pour les personnes et l'environnement en phase de construction

Lors de la construction, les substances radioactives ne sont pas présentes au sein de l'INB, les situations envisagées seraient donc uniquement susceptibles des conséquences non radiologiques.

La situation accidentelle entraînant des conséquences non radiologiques jugées enveloppes en termes d'effets chimiques, thermiques et/ou de surpression sur le public en phase de construction concernent l'explosion d'explosifs dédiés au creusement des puits.

Pour mémoire, l'utilisation d'explosifs ne concerne que la phase de construction initiale (l'activité de stockage d'explosifs disparait avant la réalisation de la tranche une pour la zone descenderie et à la fin des travaux pour la zone puits).

L'évènement redouté correspond à l'explosion du dépôt où sont stockés les explosifs et détonateurs ou du bungalow de préparation des précharges consécutif à :

- un vieillissement des explosifs ;
- des étincelles générées par un dysfonctionnement électrique ;
- un échauffement des équipements de manutention utilisés à proximité.

Les explosifs encartouchés sont stockés dans des dépôts spécifiques considérés comme installations temporaires de chantier (ITC) situées en zone puits et en zone descenderie et préparés au préalable dans un local temporaire dédié installé à proximité des zones de creusement (bungalow de préparation des précharges d'explosifs).

Les impacts en termes de surpression sont conditionnés par les quantités d'explosifs mises en jeu dans les situations accidentelles. Les quantités d'explosifs dans un dépôt, en lien avec les besoins journaliers, sont évaluées, de manière très enveloppée à ce stade du dossier, à environ 1 600 kg. Compte tenu de cette quantité, cela s'inscrit dans la nomenclature des ICPE (installations classées pour la protection de l'environnement), rubrique 4 220 qui est soumise à autorisation (quantité supérieure à 500 kg de quantité équivalente totale de matières actives).

Le bungalow de préparation des précharges est quant à lui implanté à l'aplomb des zones à creuser.

Le phénomène dangereux caractéristique associé à l'explosion est la réaction de combustion de l'explosif dont le régime dimensionnant est celui de la détonation, induisant des effets liés à l'onde de surpression associée. Pour mémoire, en ce qui concerne les effets de surpression, le seuil retenu pour l'homme, en lien avec l'annexe II de l'arrêté du 29 septembre 2005 (27) est fixé à 50 mbar (objectif de sûreté).

La définition de l'implantation des dépôts d'explosifs sera définie en phase ultérieure. Ces distances d'effets évaluées avec des hypothèses très majorantes 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. Aucune incidence ne serait ressentie à l'extérieur du centre de stockage Cigéo.

Ainsi, les dispositions de limitation des conséquences d'une explosion d'explosifs en zone puits ou en zone descenderie pourront reposer sur :

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

6.1.2.7 Gestion des situations accidentelles graves

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. Les situations éligibles au déclenchement d'un PUI sont des situations nécessitant la mise en œuvre d'une organisation et de moyens spécifiques qui se substituent à l'organisation et aux moyens habituels. Le Plan d'urgence interne peut être complété par un Plan particulier d'intervention (PPI) qui est un volet du plan ORSEC départemental qui décrit également les moyens techniques et humains, leur organisation ainsi que les modalités d'information du public en cas d'alerte.

Les modalités de gestion des situations accidentelles graves sont présentées au chapitre 19.3.2 du volume IV du présent dossier.

6.2 Incidences sur la santé humaine des situations accidentelles des autres risques du projet global Cigéo

6.2.1 Risques liés au transport des colis

Les colis de déchets radioactifs acheminés vers le centre de stockage Cigéo sont transportés dans des emballages de transport dont la robustesse et les conditions opérationnelles de leur transport (étiquetage, marquage, nombre d'emballages par wagon/camion…) sont adaptées aux risques associés aux substances radioactives qu'ils contiennent, ce conformément aux règlements en vigueur concernant les transports de matières dangereuses.

Au cas où un accident de transport aurait lieu, quel que soit le type d'accident (routier ou ferroviaire), les emballages de transport de colis de déchets radioactifs sont conçus et testés pour résister à des conditions accidentelles sévères (telles qu'une chute d'une hauteur de neuf mètres sur une surface indéformable).

Un plan de transport des colis de déchets radioactifs est établi par l'expéditeur (les producteurs) et prévoit l'itinéraire emprunté et les particularités du voyage (stationnement, hébergement, conditions particulières). Les préfectures et les groupements de gendarmerie sont informés des passages des convois. Les convois sont suivis en temps réel par géolocalisation, et tout écart entre le plan de transport et la situation réelle entraine le déclenchement d'une alerte.

Les transporteurs disposent d'un plan d'urgence et d'intervention Transports leur permettant de réagir face à un incident ou un accident de transport. Pour cela, une organisation de crise est mise en place 24 h/24 h, 7 j/7 j, prévoyant entre autres l'alerte des pouvoirs publics (pompiers, Samu, Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection…), et la mise à disposition des informations nécessaires à leur intervention. Ce dispositif de gestion de crise vise à limiter les conséquences et à mettre en place les mesures éventuellement nécessaires pour la protection du public.

Par ailleurs, les pouvoirs publics définissent des plans de réponse en cas d'accident aux niveaux national et local. L'ASNR assiste les autorités chargées des opérations de secours.

6.2.2 Risques liés au transport, réception et distribution de carburants

La construction et l'exploitation du centre de stockage Cigéo nécessitent l'utilisation de carburants pour les véhicules, les engins et les installations de combustion.

L'accident redouté pour le transport de matières dangereuses est une fuite sur le camion de livraison de carburant, d'une contenance d'une quinzaine de m^3, qui conduirait à l'épandage au sol de carburants et à la dispersion de vapeurs de carburants dans l'air. En présence d'une source d'ignition, cette fuite pourrait être à l'origine d'un incendie (effets thermiques) ou d'une explosion (effets de surpression).

En cas d'épandage, les pollutions accidentelles seraient collectées dans le réseau d'eaux pluviales et dirigées vers un bassin de confinement. Ainsi, une pollution accidentelle sur le site n'atteindrait pas l'environnement et les cours d'eau.

En cas d'incendie de carburant, les effets thermiques liés au rayonnement des flammes seraient limités et ne pourraient pas être ressentis au niveau des bâtis à l'extérieur du site. Le panache de fumées toxiques s'élèverait vite en raison de la température et se disperserait rapidement en altitude.

L'explosion de vapeurs de carburant générerait un souffle qui se propagerait sous la forme d'une onde de pression aérienne. Celle-ci pourrait générer des projections (par exemple : bris de verre). Les seuils des effets de surpression restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

6.2.3 Risques liés aux chaufferies

La fonction principale des chaufferies est le traitement de l'air (température et hygrométrie) des installations du centre de stockage Cigéo. Elles assurent également la production d'eau chaude sanitaire.

Deux chaufferies sont présentes sur le centre de stockage Cigéo, l'une est implantée sur la zone descenderie et l'autre sur la zone puits. Chacune de ces chaufferies comprend une chaudière principale biomasse alimentée par des plaquettes bois et trois chaudières d'appoint alimentées par du gaz (GPL) lors des périodes les plus froides.

La situation accidentelle redoutée lors du transport et la réception de GPL est une fuite sur la citerne de livraison ou une rupture de flexible de dépotage. En présence d'une source d'ignition, cette fuite peut être à l'origine d'un jet enflammé ou d'une inflammation à l'air libre d'un « nuage » de gaz produisant des effets thermiques et des effets de surpression. Par ailleurs, en cas de rupture brutale de la citerne, une vaporisation violente à caractère explosif du GPL contenu dans la citerne peut avoir lieu produisant également des effets thermiques et des effets de surpression. À l'intérieur de la chaufferie, une fuite sur une tuyauterie de GPL ou une défaillance sur le dispositif d'alimentation en GPL d'une chaudière peut conduire à la dispersion de gaz inflammable dans le local. En présence d'une source d'ignition, cette fuite peut être à l'origine d'un incendie ou d'une explosion dans le local.

Les effets thermiques et de surpression s'atténuent avec la distance. L'ensemble des dispositions de maîtrise des risques envisagées permet de maitriser les conséquences potentielles de ces situations accidentelles. Aucune incidence ne serait ressentie à l'extérieur du centre de stockage Cigéo.

Les plaquettes de bois qui vont alimenter les chaudières biomasse sont des combustibles qui, en cas d'incendie, sont susceptibles de s'enflammer et ainsi apporter une masse combustible. Elles sont stockées dans un silo en fosse situé à l'intérieur des bâtiments chaufferies et équipé de murs coupe-feu. Si malgré ces mesures de prévention un incendie survenait, les effets thermiques seraient très limités. Les seuils des effets thermiques restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

6.2.4 Risques liés aux substances dangereuses non radioactives

Des substances dangereuses non radioactives pourront être mises en œuvre sur le centre de stockage Cigéo. Elles seront livrées et stockées en petits ou très petits conditionnements.

Une situation accidentelle redoutée est une fuite sur un contenant qui conduit à un épandage au sol de ces dernières. Dans les zones de stockage ou de mise en œuvre des substances inflammables, en présence d'une source d'ignition, cet épandage peut être à l'origine d'un incendie, voire d'une explosion. Par ailleurs, dans le cas d'épandages simultanés de substances incompatibles, des réactions chimiques dangereuses peuvent avoir lieu (dégagements de chaleur et/ou de substances nocives, voire toxiques).

Un ensemble de mesures de maitrise des risques est mis en place, notamment le stockage des substances dangereuses sur des capacités de rétention, en tenant compte des règles d'incompatibilité et dans des locaux adaptés. Les seuils des effets thermiques restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

6.2.5 Risques liés aux installations/locaux électriques

Les situations accidentelles redoutées relatives à la présence de ces installations électriques sont des fuites potentielles d'huile au niveau des postes de transformation électrique, des départs de feu/incendies et l'explosion d'hydrogène dégagé lors de la charge des batteries des moyens de manutention et des véhicules électriques.

Le respect des règles de l'art dans la conception et l'exploitation de ces installations permet de maitriser les risques et de limiter conséquences potentielles de ces situations accidentelles. Les fuites d'huile, les seuils des effets thermiques et de surpression restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

6.2.6 Risques liés aux explosifs éventuellement mis en œuvre pour les terrassements

Des explosifs pourraient être utilisés lors de la phase d'aménagement préalable pour la réalisation des terrassements. Les impacts en termes de surpression sont conditionnés par les quantités d'explosifs mises en jeu dans les situations accidentelles. Le respect de la réglementation applicable à l'utilisation d'explosifs permet de maitriser les risques et de limiter les conséquences potentielles d'une situation accidentelle. Les seuils des effets de surpression restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

6.2.7 Risque de départ de feu de végétation lors d'un chantier

Vis-à-vis du risque de départ de feu de végétation lors d'un chantier situé dans ou à proximité immédiate de massifs forestiers, les entreprises de chantiers mettront en place des dispositions organisationnelles et matérielles adaptées (cf. Chapitre 11.3.3.7 du volume IV de la présente étude d'impact).

L'ensemble des dispositions de maitrise des risques prévues permet de maitriser les conséquences potentielles d'un départ de feu de végétation lors d'un chantier.

6.2.8 Risque de pollution des eaux souterraines lors de la création de forages/piézomètres

Les forages et piézomètres sont réalisés dans les règles de l'art en tenant compte notamment du contexte karstique dans lequel ils peuvent s'implanter.

Ces dispositions constructives sont décrites dans la mesure de réduction « R2.1d : dispositions constructives adaptées pour le creusement des forages/piézomètres » présentée au chapitre 5.4.1.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

L'ensemble des dispositions de maitrise des risques prévues permet de maitriser le risque de pollution des eaux souterraines lors de la création de forages/piézomètres.

7

Synthèse des incidences du projet global Cigéo sur la santé humaine

7.1 Émissions physiques 98
7.2 Émissions chimiques 99
7.3 Émissions radioactives 100
7.4 Après fermeture 102
7.5 Situations accidentelles 103
7.6 Conclusion 105

7.1 Émissions physiques

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions physiques sonores, vibratoires, lumineuses, olfactives, et champs électromagnétiques pendant ses phases d'aménagements préalables, de construction initiale puis de fonctionnement.

Les émissions physiques ont des incidences potentielles significatives et font l'objet de mesures d'évitement et de réduction. De plus, ces émissions se propageant dans l'air et/ou le sol, elles diminuent significativement avec la distance d'éloignement.

L'évaluation de ces émissions sur la santé a fait l'objet d'études scientifiques menées au niveau national, voire international. Les résultats et analyses ont conduit à la formalisation de recommandations d'experts nationaux et internationaux et à la détermination de seuils de nuisance et/ou de seuils réglementaires ayant pour objectif la protection de la santé des populations. Ces données servent de référence pour évaluer les nuisances potentielles du projet global Cigéo sur la santé des riverains.

7.1.1 Les émissions sonores

Les nuisances acoustiques les plus importantes du projet global Cigéo sont liées aux travaux d'aménagements préalables et de construction initiale sur les zones puits et descenderie sur une durée importante (une vingtaine d'années). Les sources de bruit sont variées, notamment les opérations de terrassement utilisant des engins de chantier comme les marteaux-piqueurs, les opérations de chargement/déchargement des matériaux, la circulation routière et ferroviaire pour le fret et les activités de construction, telles que les tirs à l'explosif pour les terrassements et le creusement des puits, mais aussi le fonctionnement des centrales à béton.

Pendant la phase de fonctionnement, les émissions de bruit sont principalement liées au fonctionnement des ouvrages tels que les usines de ventilation, le poste de transformation électrique 400/90 kV, la centrale à béton en support aux activités de construction des alvéoles de stockage qui se poursuivent dans l'installation souterraine, et la circulation routière et ferroviaire pour les déplacements du personnel et l'acheminement des colis de déchets et matériaux.

Des mesures d'évitement et de réduction sont mises en place. La zone puits et la liaison intersites (LIS) sont implantées à plus de 500 mètres des habitations. Les trains ne circulent qu'en journée (entre 6 h et 22 h) sauf de très rares exceptions sur l'installation terminale embranchée et sur la ligne ferroviaire 027000. Un convoyeur à bande transporteuse semi-enterré est mis en place pour l'acheminement des matériaux entre la zone descenderie et la zone puits. Les travaux susceptibles de causer une gêne pour le voisinage sont interrompus entre 22 h et 7 h (dans l'hypothèse où des travaux de nuit seraient nécessaires, des dérogations seront demandées dans le respect de la réglementation locale). Le merlon périphérique sud-ouest de la ZD, ainsi que le mur antibruit à proximité de l'hôtel du Bindeuil permettent notamment de protéger les habitations les plus proches. Les autres opérations du projet global sont implantées autant que possible à distance des habitations.

En phase d'aménagements préalables, les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 60 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Seul le niveau sonore au niveau de l'hôtel du Bindeuil augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit courante (<50 dBA).

En phase de construction initiale, en période diurne, les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 60 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Le niveau sonore au niveau de l'hôtel du Bindeuil augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit courante (<60 dBA). Pour toutes les autres habitations l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dBA.

En phase de construction initiale, en période nocturne, les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 55 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Le niveau sonore au niveau de l'hôtel du Bindeuil augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit courante (<55 dBA). La commune de Bure compte quelques habitations (habitations situées au sud) dont le niveau sonore augmente de plus de 10 dBA tout en restant dans une ambiance de bruit assez calme (<45 dBA). Pour toutes les autres habitations, l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dBA.

En phase de fonctionnement, en période diurne, les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 60 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Par ailleurs, l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dBA, pour toutes les habitations de l'aire d'étude, ce qui est une amélioration de l'ambiance acoustique par rapport à la phase de construction initiale en période diurne.

En phase de fonctionnement, en période nocturne, les niveaux de bruit futur engendrés par le projet global Cigéo sont inférieurs à 55 dBA correspondant à une ambiance de bruits courants. Par ailleurs, l'augmentation du niveau sonore est inférieure à 10 dbA, pour toutes les habitations de l'aire d'étude, ce qui est une amélioration de l'ambiance acoustique par rapport à la phase de construction initiale en période diurne.

Par ailleurs, les niveaux acoustiques de toutes les opérations du projet global Cigéo sont inférieurs aux seuils réglementaires applicables en période diurne et nocturne.

Pour l'ITE, les niveaux sonores liés au trafic ferroviaire (en phase de construction initiale et en phase de fonctionnement) restent en dessous de la recommandation de l'OMS de 54 dBA sur l'indice Lden (pas de trafic ferroviaire la nuit). Pour la LIS, les niveaux sonores liés au trafic routier (en phase de construction initiale et en phase de fonctionnement) restent en dessous de la recommandation de l'OMS de 53 dBA sur l'indice Lden et 45 dBA sur l'indice Lnight. Les études acoustiques spécifiques pour la ligne 027000 et pour la déviation de la route départementale D60/960 seront intégrées aux versions actualisées ultérieures de la présente étude d'impact.

Les incidences résiduelles acoustiques sur la santé humaine du projet global Cigéo sont faibles.

7.1.2 Les émissions vibratoires

Les vibrations générées par le projet global Cigéo sont principalement liées à la circulation des engins, poids lourds et trains, ainsi que celles générées par l'utilisation d'engins et d'équipements pendant les travaux sur l'ensemble des zones d'interventions potentielles. Elles sont très peu perceptibles en dehors des zones d'intervention potentielles. De plus, des tirs d'explosifs sont également réalisés pour les terrassements et le creusement des puits sur le centre de stockage Cigéo en phase de construction initiale.

Des mesures d'évitement et de réduction sont mises en place. Parmi ces mesures, sont notamment prévus la circulation des trains uniquement de jour (entre 6 h et 22 h) sauf de très rares exceptions sur l'installation terminale embranchée et sur la ligne ferroviaire 027000, l'interruption des travaux susceptibles de causer une gêne pour le voisinage entre 22 heures et 7 heures (dans l'hypothèse où des travaux de nuit seraient nécessaires, des dérogations seront demandées dans le respect de la réglementation locale), l'éloignement, autant que faire se peut, des zones habitées, l'utilisation privilégiée des infrastructures ferroviaires pour l'approvisionnement des matériaux de construction et évacuation de déchets et la limitation de la vitesse des trains.

La mise en place de ces mesures a pour effet d'éviter les émissions de vibration nocturne et de diminuer les émissions vibratoires à toutes les phases de vie du projet global Cigéo. L'exposition des populations est ainsi diminuée.

Les vibrations associées aux tirs d'explosif pour les terrassements et le creusement des puits peuvent être ressenties très ponctuellement au niveau des bâtiments d'activité les plus proches (archives EDF, hôtel du Bindeuil, Espace Technologique, Laboratoire souterrain et son bâtiment d'accueil du public de l'Andra). Toutefois, aucune habitation n'est présente à moins de 1 kilomètre et il n'y aura pas de perception des vibrations à leur niveau. Les activités sources de vibration étant réalisées en journée, elles ne sont pas susceptibles de perturber le sommeil de nuit des résidents.

Les incidences résiduelles des vibrations du projet global Cigéo sur la santé humaine sont faibles.

7.1.3 Les émissions lumineuses

Les principales sources d'émissions lumineuses du projet global Cigéo sont liées à l'éclairage des opérations de chantier pendant les phases d'aménagements préalables et de construction initiale, des bâtiments industriels et les éclairages de sécurité (postes de garde du centre de stockage Cigéo) pendant la phase de fonctionnement pour assurer la sécurité des personnes et des installations.

Des mesures d'évitement et de réduction sont mises en place. En particulier, sont notamment prévus la circulation des trains uniquement de jour (entre 6 h et 22 h) sauf de très rares exceptions sur l'installation terminale embranchée et sur la ligne ferroviaire 027000, l'interruption des travaux susceptibles de causer une gêne pour le voisinage entre 22 h et 7 h, l'éloignement, autant que faire se peut, des zones habitées, l'absence d'éclairage le long de la LIS, de l'ITE, de la ligne 027000, de l'adduction d'eau et de la déviation de la route départementale D60/960, un nombre de points d'éclairage très limité (principalement associés à la sécurité du centre de stockage) et l'optimisation de la nature et de la durée de l'éclairage.

La mise en place de ces mesures a pour effet d'éviter et de réduire les émissions lumineuses à toutes les phases de vie du projet global Cigéo et de diminuer ainsi l'exposition des populations.

La gêne engendrée par cette pollution lumineuse est faible au niveau des habitations compte tenu des mesures de réduction mises en œuvre et de l'éloignement des zones puits et descenderie du centre de stockage Cigéo.

Les incidences résiduelles des émissions lumineuses du projet global Cigéo sur la santé humaine sont faibles.

7.1.4 Les émissions olfactives

Les odeurs émises par le projet global sont liées majoritairement aux émissions atmosphériques des engins de chantier, à des opérations de travaux ponctuels, à la présence potentielle de déchets des zones de restauration et à la gestion des eaux.

Une mesure d'évitement et une mesure de réduction sont mises en œuvre : choix d'implantation du projet global Cigéo à distance des zones urbanisées et émissaires de rejets canalisés en hauteur. Des mesures de réduction concernant en premier lieu la qualité de l'air, la pollution des sols, les eaux superficielles et les déchets conventionnels permettent indirectement de limiter les odeurs qui ne seront ainsi pas perceptibles par les riverains : engins et véhicules régulièrement entretenus, mesures de gestion des eaux pluviales et usées, mesures de gestion des déchets, etc.La mise en place de ces mesures a pour objectif de réduire les émissions olfactives à toutes les phases de vie du projet global Cigéo et de limiter ainsi l'exposition des populations.

Les odeurs liées aux gaz d'échappement des moteurs thermiques et à la mise en place des enrobés routiers sont peu intenses et très localisées. Leur dispersion dans l'atmosphère est rapide. Elles sont peu perceptibles par les riverains.

Les incidences résiduelles des émissions olfactives du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

7.1.5 Les champs électromagnétiques

Les sources d'émissions de champs électriques et magnétiques sont associées aux ouvrages d'alimentation électrique du projet global Cigéo, à savoir, deux très courtes portions de ligne aérienne 400 kV, deux liaisons souterraines 90 kV, le poste de transformation 400/90 kV, les postes de livraison 90 kV et de transformation 90/20 kV implantés au niveau des zones puits et descenderie. Le champ électromagnétique de la ligne aérienne 400 kV n'est pas modifié.

Des mesures d'évitement et de réduction sont mises en place. Notamment, le positionnement des ouvrages électriques est réalisé de façon à s'éloigner le plus possible des lieux de vie. Par ailleurs, ils sont conçus et exploités conformément à des prescriptions réglementaires visant entre autres, à limiter l'exposition des tiers aux champs électriques et magnétiques.

Les champs électriques et magnétiques générés par les équipements électriques du projet global Cigéo sont très inférieurs aux limites réglementaires.

Les incidences résiduelles des émissions de champs électriques et magnétiques du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

7.2 Émissions chimiques

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions chimiques liquides et atmosphériques pendant ses phases d'aménagements préalables, de construction initiale puis de fonctionnement.

L'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions chimiques s'intéresse aux substances susceptibles d'avoir des effets sur la santé des populations environnantes du fait de leur exposition et de leur potentielle toxicité. Cette évaluation repose sur une étude du risque sanitaire conformément aux recommandations de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (20). Les émissions chimiques ont des incidences potentielles significatives sur la santé humaine et elles font l'objet de mesures d'évitement et de réduction.

7.2.1 Les émissions chimiques liquides

Les sources d'émissions chimiques liquides du projet global Cigéo sont les eaux générées et/ou gérées sur les différents lieux d'implantation et pendant toutes les phases de vie du projet (eaux pluviales, eaux de ruissellement sur les verses, eaux usées et eaux de fond).

Compte tenu des mesures d'évitement et de réduction mises en place, la bonne qualité chimique, écologique et bactériologique des eaux rejetées (avec des paramètres contrôlés inférieurs aux valeurs de référence fixées entre autres par la directive-cadre sur l'eau) et les mécanismes de transfert vers le milieu récepteur (dilution, filtration) assurent l'absence d'une dégradation potentielle de la qualité actuelle des eaux nécessaire à son usage et à ses capacités d'accueil.

L'évaluation de l'exposition humaine est réalisée selon une démarche prudente, avec des choix d'hypothèses majorantes afin de couvrir au maximum les incertitudes associées. Les populations susceptibles d'être les plus exposées aux émissions chimiques liquides du projet global Cigéo sont, compte tenu de la nature et de la quantité des émissions, les habitants de la commune de Bure car située à proximité des rejets du centre de stockage Cigéo. Il est considéré que la population ingère des produits animaux bovins (viande, lait/produits laitiers) et gibiers *via* sa ration alimentaire. Ces animaux s'abreuvent dans les ruisseaux de l'orge, de l'Ormançon et de la Bureau qui sont les milieux récepteurs de rejets liquides de Cigéo. Ainsi la voie retenue pour les évaluations de l'exposition humaine est l'ingestion.

L'évaluation quantitative des risques chimiques montre que les quotients de danger (QD) et les excès de risque individuel (ERI) calculés selon la méthodologie de l'Ineris sont inférieurs aux valeurs repères. Le risque sanitaire est qualifié selon cette méthodologie de non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine.

Ainsi, les émissions liquides (eaux rejetées) ne sont pas considérées comme une source d'émissions dangereuses pour la santé humaine, quelle que soit la phase de vie considérée (APR, CI et F).

Les incidences résiduelles des émissions chimiques des effluents du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

7.2.2 Les émissions chimiques atmosphériques

Les principales émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo en phase d'aménagements préalables sont typiques d'un grand chantier, constituées de poussières, d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre, de monoxyde de carbone et de gaz de combustion (principalement des composés organiques volatils). En phases de construction initiale et de fonctionnement, les émissions chimiques sont principalement liées à la circulation des engins et des véhicules aux travaux du centre de stockage Cigéo, puis au fonctionnement des installations, comme les chaudières, les centrales à béton, la ventilation des installations ; et aux envols de particules en lien avec le dépôt de verses et les zones de stockage de matériaux. Les composés chimiques émis sont essentiellement des poussières, des oxydes de carbone, des oxydes de soufre, du monoxyde de carbone et des gaz de combustion.

Ces émissions chimiques atmosphériques peuvent être diffuses ou canalisées. Elles sont localisées dans et aux abords du centre de stockage Cigéo et de part et d'autre des opérations des autres maîtres d'ouvrage.

Des mesures d'évitement et de réduction sont mises en place, notamment pour réduire les émissions de poussières et réduire les transports (source d'émission de gaz de combustion). Il s'agit notamment de l'implantation du stockage des verses à l'aplomb de l'installation souterraine sur la zone puits et de leur transfert de la zone descenderie vers la zone puits par un convoyeur semi-enterré, mais aussi de la brumisation des verses non couvertes. Afin de limiter les émissions de poussière par « roulage », la vitesse de circulation des véhicules est limitée et les revêtements en enrobé réalisés au plus tôt sur les pistes empruntées par les véhicules. La méthodologie recommandée par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (20), consiste à évaluer, à l'aide des valeurs toxicologiques de référence relatives aux substances étudiées, soit des quotients de danger (QD) dans le cas des substances avec effet de seuil (substances non cancérogènes), soit des excès de risque individuel (ERI) dans le cas des substances sans effet de seuil (substances cancérogènes). Cette méthodologie n'étant applicable que pour certaines substances chimiques au regard des connaissances scientifiques actuelles. Pour les autres substances chimiques, l'incidence sur la santé humaine associée est évaluée en comparant les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine aux valeurs réglementaires ou de référence pour la protection des populations disponibles.

L'évaluation de l'exposition humaine est réalisée selon une démarche prudente, avec des choix d'hypothèses majorantes afin de couvrir au maximum les incertitudes associées. Les populations susceptibles d'être les plus exposées aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo sont, compte tenu de la nature et de la quantité des émissions, celles qui se trouvent être les plus proches du centre de stockage Cigéo, à savoir celles des habitants de : Bonnet, Gillaumé, Saudron, Mandres en Barrois, Ribeaucourt et Bure, ainsi que les personnes fréquentant l'hôtel-restaurant du Bindeuil et l'école d'Échenay.

La voie d'exposition majoritaire de l'Homme aux émissions chimiques atmosphériques du projet global est l'inhalation de substances potentiellement toxiques. Les évaluations d'exposition humaine liée aux émissions chimiques atmosphériques sur la santé humaine sont effectuées par ARIA Technologies avec le logiciel AirAdvanced® Map version Standard, outil de référence de nombreuses installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Elles sont réalisées avec des hypothèses majorant les résultats (par exemple, les populations sont considérées exposées 365 jours par an pendant 70 années).

Les résultats de ces évaluations confirment qu'aucune habitation, ni aucun établissement accueillant du public ou population sensible recensés dans l'aire d'étude rapprochée du milieu physique du projet global n'est exposé à des concentrations ajoutées de substances toxiques chimiques dépassant les valeurs de référence de la réglementation (valeurs limites pour la protection de la santé humaine) ou de gestion (objectifs de qualité).

Pour les autres substances dites d'intérêts possédant des valeurs toxicologiques de référence (benzène, représentatif des composés organiques volatils, monoxyde de carbone et benzo(a)pyrène), représentatives des substances émises et traceurs de risque, les quotients de danger (QD) et les excès de risque individuel (ERI) calculés selon la méthodologie de l'Ineris sont inférieurs aux valeurs repères recommandées. Le risque sanitaire est qualifié selon cette méthodologie de non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine.

En tout état de cause, les concentrations de composés chimiques atmosphériques émis par le projet global Cigéo restent largement en deçà des valeurs réglementaires de protection de la santé humaine au niveau des habitations.

Les incidences résiduelles des émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

7.3 Émissions radioactives

Le projet global Cigéo accueillera des colis de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL) pendant toute sa phase de fonctionnement. Ces colis de déchets sont acheminés au centre de stockage Cigéo puis transférés au sein des installations jusqu'aux alvéoles de stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien. Pendant leur transport sur la voie publique ou privée et leur transfert au sein des installations du centre de stockage Cigéo, ils ne subissent aucune transformation, et sont uniquement manipulés, à distance, pour être stockés en souterrain.

Les sources d'émissions radioactives du projet global identifiées sont liées aux relâchements gazeux de quelques radionucléides (tritium, carbone 14 et krypton 85) par certains colis de déchets MA-VL, à la présence potentielle de radionucléides sur les surfaces externes des colis de déchets qui sont réceptionnés et à la récupération possible d'effluents liquides non conventionnels issus des zones à production possible de déchets nucléaires du centre de stockage Cigéo, relevant de la réglementation de l'installation nucléaire de base (INB) (41).

Les radionucléides émettent des rayonnements dont la dangerosité dépend de la nature et du niveau de radioactivité. L'évaluation des effets sur l'homme se fait à l'échelle de sa vie entière, *via* le calcul d'une « dose efficace engagée », exprimée en Sievert (Sv), ou en millisievert (mSv, soit 0,001 Sv), en prenant en compte des habitudes de vie observées localement.

Les différentes émissions radioactives du projet global Cigéo ont des incidences potentielles significatives, elles font l'objet de mesures d'évitement et de réduction dans le cadre de la conception du projet global Cigéo.

7.3.1 Les émissions liées au transport des colis de déchets

Pour pouvoir être transportés sur la voie publique, les déchets radioactifs sont conditionnés (déchets solidifiés et éventuellement immobilisés sous une forme non dispersable) et placés dans un conteneur, puis disposés dans un emballage de transport, adapté à leur dangerosité et à leurs conditions de transport.

Le blindage des emballages de transport assure la protection contre les rayonnements ionisants d'une part et la résistance aux conséquences d'un accident (tels qu'une chute ou un incendie) d'autre part. À titre d'illustration, les déchets radioactifs de haute activité (HA) sont transportés dans des emballages en acier forgé dont la masse est de l'ordre d'une centaine de tonnes.

Les limites réglementaires relatives au débit d'équivalent de dose permettent, pour un individu situé pendant une dizaine de minutes à une distance de deux mètres d'un wagon immobile chargé d'un emballage de transport de déchets radioactifs, de limiter la dose équivalente qu'il reçoit à environ 0,02 mSv.

Lorsqu'un individu est situé à une distance de deux mètres du passage d'un train de 10 wagons chargés d'emballages de transport de déchets radioactifs à des vitesses de 30 ou 40 km/h, la dose efficace corps entier de l'individu est de l'ordre de quelques de microsieverts en tenant compte d'hypothèses pénalisantes. Celle-ci s'avère plus faible encore pour une vitesse de 80 km/h.

Un même individu qui serait situé à une distance de deux mètres du passage de tous les trains intégrerait annuellement une dose efficace engagée de l'ordre de quelques dizaines de microsieverts.

Compte tenu de ces éléments, l'exposition aux convois de transport est extrêmement faible et limitée dans le temps.

7.3.2 Les effluents liquides non conventionnels issus des zones à production possible de déchets nucléaires

Le process nucléaire pour le stockage des colis de déchets radioactifs du centre de stockage Cigéo (opérations de manutention et de transferts principalement) ne génère pas d'effluents radioactifs liquides. Pendant le fonctionnement de l'INB, certains effluents collectés dans les zones à production possibles de déchets nucléaires (par exemple, liés aux condensats des unités intérieures de récupération d'énergie du bâtiment nucléaire de surface EP1) ou dans le système de collecte des eaux d'exhaure des alvéoles HA (eaux ayant été au contact des colis de déchets) peuvent contenir des substances radioactives. Ces effluents liquides dits « non conventionnels » ne sont pas rejetés localement et font l'objet d'une gestion distincte à savoir leur collecte et leur envoi vers une filière externe dédiée au traitement des déchets liquides radioactifs.

Des mesures sont mises en place. Les effluents liquides « non conventionnels » sont isolés et conditionnés. À l'issue du remplissage des cuves de collecte présentes dans le bâtiment nucléaire de surface, les effluents font l'objet d'une caractérisation radiologique afin de permettre leur transport. Ces effluents sont ensuite transférés vers une filière externe. Ils sont acheminés conformément à la réglementation transport pour leur traitement et prise en charge vers une installation adaptée.

Les quantités d'effluents liquides non conventionnels annuels estimées de manière enveloppe, au cours des premières décennies de fonctionnement de l'INB jusqu'à l'horizon 2080, sont de l'ordre de 90 m^3/an (soit de l'ordre de 90 t/an).

L'activité maximale de ces effluents liquides non conventionnels, calculée de façon enveloppe, est de l'ordre de 10 Bq/L en alpha global et 100 Bq/L en bêta global.

Ces quantités et niveaux de radioactivité ont été évalués sur des hypothèses très conservatives, très au-dessus des effluents réellement attendus.

Le centre de stockage Cigéo ne rejette donc pas, dans l'environnement local, d'effluents liquides non conventionnels.

Les incidences des émissions radioactives liquides sur la santé humaine sont donc extrêmement faibles.

7.3.3 Les émissions radioactives atmosphériques

Les radionucléides gazeux qui proviennent de certains colis de déchets MA-VL sont le tritium (^3H), le carbone 14 (^{14}C) et le krypton 85 (^{85}Kr). Ces trois radionucléides sont très volatils et restent à l'état gazeux ou sous forme de vapeur d'eau, sans former d'aérosols. Ils sont également faiblement radiotoxiques. Les particules radioactives (émetteurs alpha et bêta) pouvant être présents sur la surface externe des colis de déchets radioactifs (aussi appelée contamination surfacique labile) peuvent être mises en suspension par la ventilation des ouvrages.

Les mesures d'évitement et de réduction mises en œuvre sur le projet global Cigéo visent à la fois à éviter et à réduire les effets liés à la présence de ces radionucléides et donc l'exposition des populations. Ces mesures consistent notamment à conditionner les déchets radioactifs (colis primaires) selon les spécifications d'acceptation fixées par l'Andra, canaliser et à rejeter les émissions atmosphériques radioactives via des émissaires, mettre en place est systèmes de ventilation nucléaires équipés de filtres à très haute efficacité (rétention de 99,9 % des aérosols au minimum), à placer les émissaires de rejet en hauteur et à effectuer une mesure de la dose ambiante dans les zones contenant des colis de déchets radioactifs. Ces mesures permettent d'éviter la dispersion d'éléments radioactifs dans l'environnement, de réduire les rejets d'aérosols radioactifs dans l'environnement et les concentrations en gaz et aérosols radioactifs dans l'air et de donner l'alerte en cas de situation anormale.

L'évaluation des risques sanitaires et des incidences sur la santé humaine liés à ces émissions radioactives est réalisée selon une démarche prudente, avec des hypothèses pénalisantes (majorantes) à chaque étape :

- l'évaluation des rejets radioactifs (avec des relâchements des éléments gazeux sans considérer une capacité de rétention par le conteneur, une contamination surfacique labile des moyens de transport, des emballages et des colis au niveau maximal des seuils autorisés, la présence de colis de déchets radioactifs dans l'installation nucléaire de surface au maximum de sa capacité…) ;
- l'évaluation de la dispersion de ces rejets radioactifs puis de leur transfert dans l'environnement et la chaîne agro-alimentaire (avec un taux de présence des individus sur le lieu d'exposition égal à 100 %, un air à l'intérieur des habitations considéré identique à l'air provenant de l'extérieur…) ;
- l'évaluation de l'exposition humaine par le calcul d'une dose efficace engagée (avec la forme chimique du tritium la plus pénalisante, des émetteurs alpha et bêta assimilés à des radionucléides pénalisants, en considérant plusieurs classes d'âges de population…).

Les populations susceptibles d'être les plus exposées aux rejets atmosphériques radioactifs du projet global Cigéo sont, compte tenu de la nature et de la quantité des émissions, celles qui se trouvent être les plus proches du centre de stockage Cigéo, sous les vents dominants, et notamment de l'émissaire de la ventilation nucléaire de la zone puits.

Les évaluations sont réalisées avec la plateforme de calcul CERES (Code d'évaluations rapides environnementales et sanitaires), outil de référence du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Ces outils ont déjà été analysés par l'Autorité de sûreté nucléaire et son support technique, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

L'exposition humaine maximale liée aux émissions radioactives atmosphériques est extrêmement faible au niveau du village de Bure, de l'ordre du microsievert par an (µSv/an), soit plus de mille fois inférieure au millisievert (mSv). L'exposition humaine pour les autres villages environnants dans un rayon d'environ 8 km est encore plus faible : entre 20 % et 40 % en dessous de l'exposition potentielle de la commune de Bure. Par ailleurs, l'exposition aux convois de transport, qui ne contiendront qu'un nombre très limité de colis de déchets radioactifs et dont les passages sont peu fréquents et limités dans le temps, est encore beaucoup plus faible que celle liée aux installations du centre de stockage Cigéo.

7.3.4 Risque sanitaire lié aux émissions radioactives

En phase de fonctionnement, l'exposition humaine liée aux émissions du projet global Cigéo est ainsi largement inférieure à la contrainte réglementaire de 1 mSv/an pour les activités humaines en dehors de la radioactivité naturelle et des doses reçues en médecine et à celle de 0,25 mSv/an retenue par l'Andra. Elle est imperceptible au regard de l'exposition annuelle due à la radioactivité naturelle de la population française, même la moins exposée (moyenne à 2,9 mSv/an, et fourchette basse, correspondant à la zone de Meuse/Haute-Marne à 1,6 mSv/an). Compte tenu de la diminution rapide des concentrations en gaz et aérosols radioactifs des rejets radioactifs atmosphériques avec la distance et des faibles quantités mises en jeu, les effets du projet global ne se cumulent pas avec d'autres projets et installations nucléaires de la région.

Les incidences résiduelles des émissions radioactives liquides et atmosphériques du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles.

7.4 Après fermeture

Une fois l'installation souterraine fermée définitivement, c'est-à-dire les ouvrages souterrains ainsi que les puits et descenderies remblayés et scellés, les colis de déchets HA et MA-VL vont se dégrader lentement dans le temps. Les radionucléides contenus dans ces colis de déchets vont peu à peu être relâchés dans les alvéoles de stockage. L'eau est le principal facteur d'altération des colis de déchets et le principal vecteur de la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques contenus dans les déchets vers la biosphère.

La sûreté est alors assurée de façon totalement passive, c'est-à-dire que l'homme et l'environnement sont protégés des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir. En effet, la protection de l'homme et de l'environnement à long terme repose sur la couche du Callovo-Oxfordien, qui joue un rôle central de cette protection, complétée notamment par des dispositifs ouvragés comme les ouvrages de fermeture des liaisons surface-fond (puits et descenderies).

L'évaluation des incidences résiduelles sur la santé humaine consiste à évaluer quantitativement le niveau de protection offert par le système de stockage vis-à-vis des quelques radionucléides et substances toxiques chimiques qui parviendraient éventuellement jusqu' à un exutoire (point d'extraction d'eau) accessible à l'homme et qui en ferait usage pour ses activités (eau de boisson, irrigation, abreuvement des animaux…).

L'évaluation de la sûreté après fermeture vise à s'assurer de manière robuste que le système de stockage (milieu naturel, en particulier la couche argileuse hôte du Callovo-Oxfordien, les composants ouvragés du stockage, en particulier les colis de déchets et les scellements, et l'architecture du stockage) garantit la protection de l'homme et de l'environnement dans le temps.

Pour mener l'évaluation de sûreté après fermeture, l'Andra met en œuvre une démarche rigoureuse et prudente, en cohérence avec les exigences de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et les pratiques internationales. Cette démarche a été éprouvée et enrichie depuis plus de 30 ans au travers des nombreux dossiers remis par l'Andra et évalués par l'ASN, des revues d'experts internationales et des revues d'experts mandatées par des parties prenantes. Les grandes lignes de cette démarche sont les suivantes :

- d'une part elle est à la fois qualitative et quantitative. Elle repose ainsi sur des arguments croisés et la quantification d'indicateurs relatifs :
  - ✓ au fondement du stockage géologique profond, comme par exemple la quantité de radionucléides qui est restée confinée dans le stockage, ou dans son champ proche dans la couche argileuse hôte, à un million d'années ou la concentration en radionucléide dans l'eau à un exutoire (pompage dans une nappe, rivière) ;
  - ✓ à l'impact sur la santé humaine, comme la dose radiologique annuelle totale à laquelle pourrait être exposée un être humain. Cette dose s'apprécie au regard de la valeur repère de 0,25 mSv retenue par l'Autorité de sûreté nucléaire comme indicateur pour le stockage de déchets radioactifs en après fermeture, elle-même inférieure à la limite de dose annuelle pour la population de 1 mSv.
- d'autre part, elle considère différentes situations et scénarios qui permettent à la fois :
  - ✓ d'évaluer la performance du stockage pour les scénarios d'évolution les plus probables, conformément aux objectifs fixés par l'ASN pour ces situations ;
  - ✓ de couvrir de manière prudente (*i.e.* Enveloppe) les incertitudes résiduelles de connaissances sur le comportement du stockage et du milieu naturel dans le temps (par exemple en retenant des valeurs conservatives de paramètre sur le relâchement et la migration des radionucléides) ;
  - ✓ de démontrer la robustesse du stockage même en cas d'occurrence d'évènements « postulés » de manière conventionnel (« arbitraire ») et pénalisantes, relatifs aux composants du stockage ou du milieu géologique (par exemple la défaillance de tous les scellements ou l'existence d'une fracture dans la roche hôte qui n'aurait pas été vue).

Les scénarios de sûreté après fermeture sont définis pour représenter la manière dont les radionucléides et les substances toxiques chimiques contenus dans les déchets sont susceptibles d'arriver jusqu'à l'homme.

La démarche repose sur des scénarios contrastés permettant d'évaluer le fonctionnement prévu du stockage ainsi que la robustesse de celui-ci face aux incertitudes.

Le scénario d'évolution normale « de référence » permet d'évaluer la performance de sûreté attendue du stockage en se fondant sur l'état des connaissances scientifiques et technologiques disponibles, admises et issues en particulier des recherches menées par le monde académique dans le domaine de stockage mais aussi dans d'autres domaines et sur les exigences garanties par conception de l'installation. De manière prudente, ce scénario intègre également un certain nombre de représentations conservatives du stockage et de son environnement (par exemple le fait de considérer le stockage saturé d'eau dès sa fermeture alors que cette saturation ne sera atteinte que bien au-delà de plusieurs dizaines de milliers d'années, du fait notamment de la faible perméabilité de la roche hôte d'où de très faibles flux d'eau qui y circulent, ou le fait de représenter des exutoires par pompage captant la totalité des radionucléides arrivant dans une zone et non la quantité et la concentration locales autour du pompage).

Afin de démontrer la robustesse de la démonstration de sûreté après fermeture vis-à-vis de la conception du stockage et des incertitudes de connaissances résiduelles, d'autres scénarios sont étudiés :

- une situation d'évolution normale « enveloppe » qui cumule des valeurs et hypothèses conservatives. Cette représentation majore le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère puis à l'homme. Elle constitue une borne supérieure de l'impact cumulé des incertitudes résiduelles de connaissance. Elle constitue par ce choix d'hypothèses et de données conservatives, la limite du domaine d'évolution normale du système de stockage et de son environnement ;
- des scénarios de déviation de l'évolution normale, que l'on qualifie de scénarios d'évolution altérée, de scénarios *What-if*, ou de scénarios d'intrusion humaine involontaire.

Ces scénarios visent à tester la robustesse du système de stockage à une perte ou une dégradation d'une fonction de sûreté fondamentale de ce dernier, même si cette perte ou dégradation est considérée comme peu ou très peu vraisemblable. Il s'agit par exemple de la défaillance de tous les scellements ou d'une intrusion humaine involontaire dans le stockage par un forage en cas d'oubli de l'existence de ce dernier sur le long terme.

L'évaluation de sûreté présentée dans le dossier de demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo traite l'ensemble des scénarios indiqués ci-dessus, en incluant des demandes de l'ASN et de son appui technique l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) faites lors de l'instruction du dossier d'option de sûreté. Elle permet de tester plus encore la robustesse de la sûreté après fermeture, en particulier au travers de la combinatoire de conservatismes, par exemple sur les valeurs de paramètre de migration des radionucléides, ou le choix postulé de situation/scénario, comme un effondrement dans un alvéole de déchets MA-VL qui conduirait à limiter la garde de roche hôte au droit de cet alvéole.

L'évaluation quantitative est menée à l'aide d'outils numériques capables de simuler et de quantifier le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques par les colis, leur migration dans les ouvrages souterrains, dans la couche du Callovo-Oxfordien puis les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires. Ces outils font l'objet d'une démarche de qualification permettant de s'assurer de leur utilisation pertinente, notamment en termes d'analyse des résultats, en particulier sur le plan numérique, par exemple au travers d'exercices d'inter-comparaisons de codes de calcul.

Les résultats de l'évaluation de sûreté après fermeture confirment la capacité du stockage et du milieu géologique, plus particulièrement la roche argileuse hôte du Callovo-Oxfordien, à garantir la sûreté sur le long terme. Ils soulignent :

- le rôle central de la roche hôte de par ses caractéristiques (faible perméabilité, capacité de rétention élevée des radionucléides, faible migration des radionucléides très solubles et non retenus du fait d'une faible diffusion, épaisseur élevée…) ;
- la complémentarité apportée par le stockage et sa conception. Cette dernière vise à garantir le maintien des caractéristiques favorables de la roche hôte (par exemple en limitant la température maximale dans la roche hôte en deçà de 100 °C autour des quartiers de déchets exothermiques, comme les déchets vitrifiés de hautes activités) et à tirer parti de ces caractéristiques.

Il ressort de l'ensemble des études de l'évaluation de sûreté après fermeture que

- la grande majorité des radionucléides restent dans le stockage ou en son champ proche ;
- seuls quelques radionucléides, ceux à vie longue et mobiles, parviennent aux extrémités de la roche hôte puis aux exutoires, mais en quantité faible et diluée dans le temps et l'espace.

Cela est le cas pour le scénario d'évolution normale, mais aussi pour les autres scénarios, qui mobilisent peu de radionucléides du fait des caractéristiques de la roche hôte du Callovo-Oxfordien, même en prenant en compte des propriétés dégradées, et de la conception du stockage. Par exemple un forage ou une fracture de la roche hôte qui intercepte un alvéole de stockage ne mobilise qu'une fraction de la quantité de radionucléides contenue dans cet alvéole.

En termes d'indicateur de dose à l'homme, pour le scénario d'évolution normal de référence, représentatif du comportement attendu du stockage, la dose maximale est de l'ordre de 0,0015 mSv/an, donc très inférieure à la valeur de référence de 0,25 mSv/an. Le scénario d'évolution normale « enveloppe » conduit à des impacts qui sont au maximum de l'ordre de grandeur de cette valeur de référence.

La démonstration de la robustesse du système de stockage est renforcée par les résultats des scénarios de déviation de l'évolution normale du système de stockage et de son environnement, ce d'autant que ces scénarios ont traité les deux situations notamment la situation enveloppe du scénario d'évolution normale qui est fondée sur les caractéristiques « enveloppes » de la couche du Callovo-Oxfordien.

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 du même ordre de grandeur que celle du scénario d'évolution normale.

Dans tous les cas pour les scénarios SEA, *What-if*, SIHI, 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 SEN (0,25 mSv/an).

En termes d'indicateurs d'évaluation des risques radiologique et chimique sur la faune et la flore sauvage, les indicateurs de quotient de danger restent très inférieurs à la valeur de 1 permettant ainsi d'écarter le risque dès le niveau 1 de l'approche graduée.

L'ensemble des résultats confirment ainsi la robustesse du système de stockage face aux incertitudes résiduelles de connaissance.

7.5 Situations accidentelles

7.5.1 Situations accidentelles de l'INB Cigéo

La maîtrise des risques dans les installations nucléaires de base fait l'objet d'une attention particulière, basée sur le principe de la défense en profondeur, qui consiste à prévoir plusieurs niveaux de défense indépendants, chacun pouvant intervenir après défaillance du précédent, afin de prévenir la survenue d'un incident ou d'un accident et d'en limiter les conséquences sur la population et sur l'environnement.

Ainsi, la création de l'INB impose la réalisation d'une étude de maîtrise des risques qui est jointe à la demande d'autorisation de création.

Cette étude expose l'inventaire des risques que présente l'installation projetée ainsi que l'analyse des dispositions prises pour prévenir ces risques et des mesures propres à limiter la probabilité des accidents et leurs effets. Son contenu est en relation avec l'importance des dangers présentés par l'installation et de leurs effets prévisibles, en cas de sinistre, sur la sécurité, la santé et la salubrité publiques ou la protection de la nature et de l'environnement.

La méthodologie et les règles d'études s'appuient principalement sur la réglementation applicable à toute INB, sur les règles fondamentales de sûreté (RFS) et les guides relatifs aux INB.

L'analyse de sûreté repose sur une analyse de risques et une analyse par situations de fonctionnement, permettant d'identifier les différentes situations auxquelles l'installation peut être confrontée, de les regrouper selon leur vraisemblance, et de vérifier que les moyens techniques et organisationnels qui en garantissent la maîtrise permettent la protection des intérêts, c'est-à-dire la protection de la sécurité, la santé et la salubrité publique ainsi que la protection de la nature et de l'environnement.

Ces situations couvrent le fonctionnement normal et le fonctionnement dégradé, les situations incidentelles et accidentelles de dimensionnement ainsi que des situations accidentelles plus complexes (situations d'extension du dimensionnement) pouvant être la résultante de plusieurs événements cumulés ou d'évènements climatiques extrêmes (notamment issus du retour d'expérience de l'accident de Fukushima).

Elles concernent principalement des situations de chute de colis de déchets radioactifs en cours de manutention, d'incendie à proximité de colis de déchets ou encore des situations liées à des aléas externes (ex : séisme).

Une synthèse des résultats de plusieurs situations accidentelles est développée dans l'étude de maitrise des risques :

- des situations accidentelles jugées plausibles mais qui ne présentent pas d'impacts radiologiques significatifs sur l'homme et l'environnement ;
  - ✓ chute d'un colis primaire à la suite de la défaillance d'un pont ;
  - ✓ incendie d'un chariot de transfert des colis dans le bâtiment nucléaire de surface.
- des situations accidentelles dont la plausibilité est moindre mais qui seraient les plus sévères en termes de dose maximale sur l'homme et l'environnement (situations accidentelles sévères) :
  - ✓ chute d'un emballage ouvert de transport MA-VL lors de son déchargement dans le bâtiment nucléaire de surface ;
  - ✓ inflammation d'un colis de déchets bitumés dans un colis de stockage.

Une estimation des doses reçues par l'homme et l'environnement est réalisée, à différentes distances des zones descenderie et puits de l'INB, dans les conditions météorologiques les plus défavorables et en prenant en compte des hypothèses majorantes. En vue de démontrer le caractère robuste de la démarche de sûreté, l'estimation des doses reçues par les populations et l'environnement en 24 heures est comparée aux objectifs de protection.

Dans l'éventualité d'un accident sur l'INB 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 dans le temps et dans l'espace de type mise à l'abri.

7.5.2 Situations accidentelles des autres risques du projet global Cigéo

7.5.2.1 Risques liés au transport des colis

Les colis de déchets radioactifs acheminés vers le centre de stockage Cigéo sont transportés dans des emballages de transport dont la robustesse et les conditions opérationnelles de leur transport (étiquetage, marquage, nombre d'emballages par wagon/camion…) sont adaptés aux risques associés aux substances radioactives qu'ils contiennent, ce conformément aux règlements en vigueur concernant les transports de matières dangereuses.

Au cas où un accident de transport aurait lieu, quel que soit le type d'accident (routier ou ferroviaire), les emballages de transport de colis de déchets radioactifs sont conçus et testés pour résister à des conditions accidentelles sévères (telles qu'une chute d'une hauteur de neuf mètres sur une surface indéformable).

Un plan de transport des colis de déchets radioactifs est établi par l'expéditeur (les producteurs) et prévoit l'itinéraire emprunté et les particularités du voyage (stationnement, hébergement, conditions particulières). Les préfectures et les groupements de gendarmerie sont informés des passages des convois. Les convois sont suivis en temps réel par géolocalisation, et tout écart entre le plan de transport et la situation réelle entraine le déclenchement d'une alerte.

Les transporteurs disposent d'un plan d'urgence et d'intervention transports leur permettant de réagir face à un incident ou un accident de transport. Pour cela, une organisation de crise est mise en place 24 h/24 h, 7 j/7 j, prévoyant entre autres l'alerte des pouvoirs publics (pompiers, Samu, Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection…), et la mise à disposition des informations nécessaires à leur intervention. Ce dispositif de gestion de crise vise à limiter les conséquences et à mettre en place les mesures éventuellement nécessaires pour la protection du public.

Par ailleurs, les pouvoirs publics définissent des plans de réponse en cas d'accident aux niveaux national et local. L'ASNR assiste les autorités chargées des opérations de secours.

7.5.2.2 Risques liés au transport, réception et distribution de carburants

La construction et l'exploitation du centre de stockage Cigéo nécessitent l'utilisation de carburants pour les véhicules, les engins et les installations de combustion.

L'accident redouté pour le transport de matières dangereuses est une fuite sur le camion de livraison de carburant, d'une contenance d'une quinzaine de m3, qui conduirait à l'épandage au sol de carburants et à la dispersion de vapeurs de carburants dans l'air. En présence d'une source d'ignition, cette fuite pourrait être à l'origine d'un incendie (effets thermiques) ou d'une explosion (effets de surpression).

En cas d'épandage, les pollutions accidentelles seraient collectées dans le réseau d'eaux pluviales et dirigées vers un bassin de confinement. Ainsi, une pollution accidentelle sur le site n'atteindrait pas l'environnement et les cours d'eau.

En cas d'incendie de carburant, les effets thermiques liés au rayonnement des flammes seraient limités et ne pourraient pas être ressentis au niveau des bâtis à l'extérieur du site. Le panache de fumées toxiques s'élèverait vite en raison de la température et se disperserait rapidement en altitude.

L'explosion de vapeurs de carburant générerait un souffle qui se propagerait sous la forme d'une onde de pression aérienne. Celle-ci pourrait générer des projections (par exemple : bris de verre). Les seuils des effets de surpression restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

7.5.2.3 Risques liés aux chaufferies

La fonction principale des chaufferies est le traitement de l'air (température et hygrométrie) des installations du centre de stockage Cigéo. Elles assurent également la production d'eau chaude sanitaire.

Deux chaufferies sont présentes sur le centre de stockage Cigéo, l'une est implantée sur la zone descenderie et l'autre sur la zone puits. Chacune de ces chaufferies comprend une chaudière principale biomasse alimentée par des plaquettes bois et trois chaudières d'appoint alimentées par du gaz (GPL) lors des périodes les plus froides.

La situation accidentelle redoutée lors du transport et la réception de GPL est une fuite sur la citerne de livraison ou une rupture de flexible de dépotage. En présence d'une source d'ignition, cette fuite peut être à l'origine d'un jet enflammé ou d'une inflammation à l'air libre d'un « nuage » de gaz produisant des effets thermiques et des effets de surpression. Par ailleurs, en cas de rupture brutale de la citerne, une vaporisation violente à caractère explosif du GPL contenu dans la citerne peut avoir lieu produisant également des effets thermiques, des effets de surpression et des projectiles. À l'intérieur de la chaufferie, une fuite sur une tuyauterie de GPL ou une défaillance sur le dispositif d'alimentation en GPL d'une chaudière peut conduire à la dispersion de gaz inflammable dans le local. En présence d'une source d'ignition, cette fuite peut être à l'origine d'un incendie ou d'une explosion dans le local.

Les effets thermiques et de surpression s'atténuent avec la distance. L'ensemble des dispositions de maîtrise des risques envisagées permet de maitriser les conséquences potentielles de ces situations accidentelles. Aucune incidence ne serait ressentie à l'extérieur du centre de stockage Cigéo.

Les plaquettes de bois qui vont alimenter les chaudières biomasse sont des combustibles qui, en cas d'incendie, sont susceptibles de s'enflammer et ainsi apporter une masse combustible. Elles sont stockées dans un silo en fosse situé à l'intérieur des bâtiments chaufferies et équipé de murs coupe-feu. Si malgré ces mesures de prévention un incendie survenait, les effets thermiques seraient très limités. Les seuils des effets thermiques restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

7.5.2.4 Risques liés aux substances dangereuses non radioactives

Des substances dangereuses non radioactives pourront être mises en œuvre sur le centre de stockage Cigéo. Elles seront livrées et stockées en petits ou très petits conditionnements.

Une situation accidentelle redoutée est une fuite sur un contenant qui conduit à un épandage au sol de ces dernières. Dans les zones de stockage ou de mise en œuvre des substances inflammables, en présence d'une source d'ignition, cet épandage peut être à l'origine d'un incendie, voire d'une explosion. Par ailleurs, dans le cas d'épandages simultanés de substances incompatibles, des réactions chimiques dangereuses peuvent avoir lieu (dégagements de chaleur et/ou de substances nocives, voire toxiques).

Un ensemble de mesures de maitrise des risques est mis en place, notamment le stockage des substances dangereuses sur des capacités de rétention, en tenant compte des règles d'incompatibilité et dans des locaux adaptés. Les seuils des effets thermiques restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

7.5.2.5 Risques liés aux installations/locaux électriques

Les situations accidentelles redoutées relatives à la présence de ces installations électriques sont des fuites potentielles d'huile au niveau des postes de transformation électrique, des départs de feu/incendies et l'explosion d'hydrogène dégagé lors de la charge des batteries des moyens de manutention et des véhicules électriques.

Le respect des règles de l'art dans la conception et l'exploitation de ces installations permet de maitriser les risques et de limiter conséquences potentielles de ces situations accidentelles. Les fuites d'huile, les seuils des effets thermiques et de surpression restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

7.5.2.6 Risques liés aux explosifs éventuellement mis en œuvre pour les terrassements

Des explosifs pourraient être utilisés lors de la phase d'aménagement préalable pour la réalisation des terrassements. Les impacts en termes de surpression sont conditionnés par les quantités d'explosifs mises en jeu dans les situations accidentelles. Le respect de la réglementation applicable à l'utilisation d'explosifs permet de maitriser les risques et de limiter les conséquences potentielles d'une situation accidentelle. Les seuils des effets de surpression restent contenus dans les limites du centre de stockage Cigéo.

7.5.2.7 Risque de départ de feu de végétation lors d'un chantier

Vis-à-vis du risque de départ de feu de végétation lors d'un chantier situé dans ou à proximité immédiate de massifs forestiers, les entreprises de chantiers mettront en place des dispositions organisationnelles et matérielles adaptées. L'ensemble des dispositions de maitrise des risques prévues permet de maitriser les conséquences potentielles d'un départ de feu de végétation lors d'un chantier.

7.5.2.8 Risque de pollution des eaux souterraines lors de la création de forages/piézomètres

Les forages et piézomètres sont réalisés dans les règles de l'art en tenant compte notamment du contexte karstique dans lequel ils peuvent s'implanter. L'ensemble des dispositions de maitrise des risques prévues permet de maitriser le risque de pollution des eaux souterraines lors de la création de forages/piézomètres.

7.6 Conclusion

À toutes les phases du projet global Cigéo (aménagements préalables, construction initiale, fonctionnement, après fermeture, ainsi que lors d'une situation accidentelle), les incidences résiduelles :

- des émissions physiques sont faibles pour les émissions sonores, vibratoires, lumineuses et très faibles pour les émissions olfactives et les champs électromagnétiques ;
- des émissions chimiques et des émissions radioactives à partir de la phase de fonctionnement sont très faibles.

Les émissions du projet global Cigéo ont une incidence faible sur la santé humaine.

8

Méthodes

8.1 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions physiques 108

8.2 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions chimiques 110

8.3 Méthodes d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions radiologiques 114

8.4 Méthodes d'évaluation des incidences après fermeture sur la santé humaine 121

8.5 Méthode d'évaluation des incidences des situations accidentelles sur la santé humaine 126

L'évaluation des incidences sur la santé humaine du projet global Cigéo a pour objet d'apporter des éléments d'appréciation des incidences du projet global Cigéo sur les populations environnantes à toutes les phases du projet. Cette évaluation constitue une aide aux décideurs (États, agents instructeurs) et à l'opérateur industriel pour vérifier que le projet ne présente pas d'incidences notables pour la santé humaine. Cette évaluation ne permet pas une estimation prévisionnelle de l'impact sanitaire du projet global Cigéo comme on l'entend en santé publique ou en épidémiologie, c'est-à-dire en termes de nombre de cas qui pourraient être directement imputables aux émissions du projet.

La démarche des évaluations des incidences sur la santé humaine se déroule généralement en quatre étapes :

- la quantification des émissions ;
- l'identification des dangers associés aux substances émises ;
- l'analyse des effets potentiels sur la santé suite à l'évaluation des expositions des populations ;
- la caractérisation des risques mettant en relation les niveaux d'exposition estimés avec les indicateurs et objectifs de protection (issus des meilleures connaissances scientifiques et/ou de la réglementation).

En phase de fonctionnement, l'évaluation des incidences du projet global Cigéo sur la santé humaine est présentée, selon trois grandes familles d'émissions : physiques, chimiques (incluant les poussières) et radiologiques.

Les approches permettant d'estimer le risque sanitaire sont présentées pour chaque famille d'émissions.

Pour toutes les émissions faisant partie du projet global Cigéo, les sources ont été évaluées par phase et par type d'activités.

Par ailleurs, une demande sociétale pour la mise en place d'un suivi de l'état de santé des populations a été exprimée à plusieurs reprises, notamment par le Clis (Comité local d'information et de suivi de Bure) qui depuis la création du Laboratoire souterrain a demandé « la réalisation d'un observatoire épidémiologique chargé de procéder à un état de référence et un suivi épidémiologique » ou par la Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs instituée par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (59) qui recommande dans ses rapports de 2010, 2012 et 2014 de disposer d'une base de données de santé.

Dans ce contexte, un groupe de travail réunissant le Comité local d'information et de suivi (Clis) du laboratoire de Bure, la Préfecture de la Meuse, coordinatrice de la mission Cigéo, l'Agence régionale de santé (ARS) Grand Est, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et Santé publique France, a recommandé la mise en place d'un dispositif de surveillance épidémiologique et de veille sanitaire. De cette démarche est né l'Observatoire de la santé des riverains du projet de centre de stockage de Bure (OSaRiB) piloté par la Santé publique France et animé par l'Observatoire régional de Santé (ORS) Grand Est.

La constitution et la mise en œuvre de l'Observatoire de la santé des riverains autour du centre de stockage Cigéo (OSaRiB) fait l'objet d'une convention cadre signée le 30 septembre 2022 entre Santé publique France, l'ARS Grand Est, le Comité local d'information et de suivi du laboratoire souterrain de Bure et la préfecture de la Meuse. Cette convention a pour objet de définir les contributions de chacun à l'OSaRiB ainsi que leurs modalités de collaboration. Par ailleurs, chacun s'engage à apporter ses compétences, ses connaissances et savoir-faire, ses moyens humains, matériels, financiers et techniques nécessaires à la mise en œuvre de l'OSaRiB (60).

L'OSaRiB a pour objectif de décrire l'état de santé de la population riveraine et d'une population non riveraine constituée de la communauté de communes de Vitry, Champagne et Der dans la Marne et son évolution dans le temps. Il permettra d'évaluer à un instant t l'état de santé physique et psychologique de la population puis, si le centre de stockage Cigéo est accepté, de renouveler cet état des lieux à intervalles réguliers afin d'identifier d'éventuelles évolutions sanitaires. Ce dispositif est articulé autour de quatre volets :

- une analyse du contexte local, réalisée par l'ORS Grand Est avec le soutien de Santé publique France, destinée à comprendre le vécu sur le territoire, d'analyser les représentations en termes de santé et d'environnement, la perception des risques et les inquiétudes, repérer les tensions éventuelles et les décalages de points de vue (pour les éléments précédents) et recenser les attentes ;
- une enquête de santé perçue en population générale réalisée par Santé publique France avec le soutien de l'ARS Grand Est destinée à recueillir, directement auprès de la population riveraine et non riveraine, des informations relatives à leur état de santé, qui ne figurent dans aucune autre source de données ;
- une étude de santé « objectivée » menée par Santé publique France destinée à dénombrer l'ensemble des évènements de santé affectant la population et donnant lieu à un recours aux soins qui pourraient, dans les cas les plus graves conduire à un décès ;
- un état des lieux du contexte démographique et socio-économique et autres déterminants de santé du territoire concerné, réalisée sur la zone riveraine du projet de centre de stockage, par l'ORS Grand Est, avec le soutien de l'ARS Grand Est et du Clis.

L'Andra en tant que futur exploitant reste mobilisé pour contribuer dans la limite de ses prérogatives aux démarches de santé publique qui pourraient être menées autour du centre de stockage Cigéo.

8.1 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions physiques

8.1.1 Méthode d'évaluation

Les émissions physiques étudiées sont les émissions sonores, vibratoires, lumineuses, olfactives et les champs électromagnétiques. Il n'existe pas de méthodologie spécifique concernant l'évaluation de l'impact de ces émissions physiques. Par ailleurs, les études scientifiques ne démontrent pas à ce jour de relation dose-effet entre l'exposition à des émissions sonores, à des champs électriques ou magnétiques et la survenue de pathologies. Ainsi, il n'est pas possible de caractériser des risques. Les expositions des populations sont donc analysées au regard de seuils de nuisances ou de recommandations issues d'études scientifiques.

Les sources et les propagations sonores sont modélisées dans le cadre d'études acoustiques. Le logiciel utilisé pour réaliser les modélisations 3D est CADNAA de DATAKUSTIK. Les données et hypothèses de modélisations sont présentées dans les chapitres 13 des volumes IV et VII de la présente étude d'impact. Les résultats des modélisations sont ensuite comparés aux niveaux de seuils réglementaires existants.

Les champs électriques et magnétiques sont générés par les installations de basse fréquence (50 Hz) utilisées pour l'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo. Les valeurs moyennes de ces champs mesurés sur l'installation souterraine ou aérienne sont prises comme référence (conception similaire) pour l'évaluation de l'exposition humaine. Elles sont comparées aux recommandations édictées par la Commission européenne (15).

En termes d'analyse des risques sanitaires associés, lorsque les valeurs d'exposition humaine estimées pour les émissions physiques sont inférieures aux seuils réglementaires ou aux recommandations, il est considéré que l'effet est faible à très faible pour la santé humaine.

8.1.2 Seuils de nuisances et recommandations pour le bruit

En fonction des phases et des opérations étudiées, les exigences acoustiques réglementaires sont différentes. Celles-ci sont détaillées en annexe 9 du volume VII de la présente étude d'impact. Les résultats des modélisations sont comparés aux exigences réglementaires. En l'absence de seuils réglementaires, l'incidence est évaluée par analyse de l'évolution du niveau sonore futur attendu par rapport à l'existant et avec l'échelle de bruits communs.

En période diurne, un tableau permet d'évaluer les incidences acoustiques sur les habitations au regard du type d'ambiance (de « calme » à « modérée à bruyante ») et de l'augmentation du niveau sonore selon trois classes :

- inférieure à 5 dBA : émergence admissible pour la période diurne (réglementation ICPE) ;
- comprise entre 5 dBA et 10 dBA : augmentation significative du niveau sonore ;
- supérieure à 10 dBA : augmentation significative importante du niveau sonore.

En période nocturne un tableau permet d'évaluer les incidences acoustiques sur les habitations au regard du type d'ambiance (de « calme » à « modérée à bruyante ») et de l'augmentation du niveau sonore selon quatre classes :

- inférieure à 3 dBA : émergence admissible pour la période nocturne (réglementation ICPE) ;
- inférieure à 5 dBA : émergence admissible pour la période diurne (réglementation ICPE) ;
- comprise entre 5 dbA et 10 dBA : augmentation significative du niveau sonore ;
- supérieure à 10 dBA : augmentation significative importante du niveau sonore.

8.1.2.1 Réglementation française

S'agissant des installations classées pour la protection de l'environnement, l'arrêté du 23 janvier 1997 (6) relatif à la limitation des bruits émis dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement[23] prévoit que les niveaux de bruit à ne pas dépasser en limites de propriété de l'établissement sont fixés par l'arrêté d'autorisation et ne peuvent excéder 70 dBA pour la période de jour et 60 dBA pour la période de nuit, sauf si le bruit résiduel pour la période considérée est supérieur à cette limite, et de limiter l'augmentation du volume sonore entre trois et six décibels au niveau des habitations les plus proches, selon le niveau de bruit ambiant existant.

Les installations nucléaires de base (INB) sont également concernées par les dispositions de l'arrêté précité, en vertu de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux INB (41).

Les ouvrages électriques construits après 2007 sont soumis en matière de bruit à l'arrêté technique du 17 mai 2001 (16) fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique. Ainsi, l'article 12 ter de cet arrêté prévoit que le niveau de bruit ambiant, comportant l'ensemble des bruits y compris celui des installations électriques, est inférieur à 30 dB(A) ; l'émergence du bruit, mesurée de façon continue, est inférieure à 5 dB(A) le jour et à 3 dB(A) la nuit.

Pour les infrastructures routières et ferroviaires, la réglementation française fixe des seuils à ne pas dépasser, de l'ordre 60-70 décibels (dB(A)) au droit des bâtiments visés[24].

Pour les chantiers de construction, aucun seuil n'est fixé par la réglementation, hormis par d'éventuels arrêtés locaux (municipaux ou préfectoraux). Les arrêtés préfectoraux portant réglementation des bruits de voisinage applicables dans les départements de la Meuse et de la Haute-Marne sont :

- l'arrêté préfectoral n° 2000-1269 en date du 6 juillet 2000 portant réglementation des bruits de voisinage de la Meuse (63);
- l'arrêté préfectoral n° 3143 en date du 11 décembre 2008 relatifs à la lutte contre les bruits de voisinage de la Haute-Marne (64).

[23] Cet arrêté ne concerne que les installations soumises au régime de l'autorisation

L'article R. 1336-5 du code de la santé publique impose que les travaux ne portent pas atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé de l'homme.

Les résultats des modélisations sont comparés aux exigences réglementaires. En l'absence de seuils réglementaires, l'incidence est évaluée par analyse de l'évolution du niveau sonore futur attendu par rapport à l'existant et au regard du type d'ambiance (de « calme » à « modérée à bruyante ») de l'échelle de bruits communs.

Les réglementations et recommandations acoustiques applicables sont présentées en détails en annexe 9 du volume VII de la présente étude d'impact.

8.1.2.2 Recommandations OMS

Les lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement publiées par le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe en 2018 (7), définissent des niveaux d'exposition recommandés au bruit provenant des transports (trafics routier, ferroviaire et aérien), des éoliennes et des loisirs, pour protéger la santé des populations.

Les composantes du projet global Cigéo concernées sont les infrastructures routières (déviation de la route départementale D60/960 et la LIS), ainsi que les infrastructures ferroviaire (ITE et ligne 027000).

Les valeurs de bruit dû au trafic routier et au trafic ferroviaire en façade recommandées par l'OMS, sont les suivantes :

- pour le trafic automobile :
  - ✓ un niveau sonore maximal sur 24 h Lden de 53 dB(A) ;
  - ✓ un niveau sonore maximal pour la période nocturne Lnight de 45 dB(A).
- pour le trafic ferroviaire :
  - ✓ un niveau sonore maximal sur 24 h Lden de 54 dB(A) ;
  - ✓ un niveau sonore maximal pour la période nocturne Lnight de 44 dB(A).

Les seuils fixés par la réglementation applicable en France sont supérieurs à ces recommandations.

8.1.3 Seuils de nuisances et recommandations pour les vibrations

Les seuils retenus pour l'évaluation des effets vibratoires sont les suivants :

- pour les dommages aux structures :
  - ✓ 2 $mm.s^{-1}$ pour les vibrations continues [circulaire n° 86-23 du 23 juillet 1986 « relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les ICPE » (65) ;
  - ✓ 4 $mm.s^{-1}$ pour les vibrations impulsionnelles [circulaire n° 86-23 du 23 juillet 1986 « relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les ICPE » ;
  - ✓ 10 $mm.s^{-1}$ pour les vibrations engendrées par des tirs d'explosifs (cf. Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières (66)).
- pour la perception par l'être humain : 0,10 $mm.s^{-1}$ (cf. NF ISO 2631-2 de 2014 (8)).

La distance de propagation des vibrations émises par les sources de vibrations mécaniques dépend du type de sol (cf. Chapitre 13 du volume III de la présente étude d'impact). Quel que soit le type de sol, il est constaté une forte diminution des vibrations au-delà de quelques dizaines de mètres. Il est généralement admis qu'au-delà de 50 mètres des sources de vibration, il n'y a plus de risques pour les structures et au-delà de 100 mètres les vibrations sont en dessous du seuil de perception humaine.

[24] Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières (61), arrêté du 8 novembre 1999 relatif au bruit des infrastructures ferroviaires (62).

8.1.4 Seuils de nuisances et recommandations pour les champs électromagnétiques

Pour prévenir les éventuels effets liés à une exposition à des champs électromagnétiques trop intenses, des valeurs limites d'exposition ont été définies par la réglementation française. Ces valeurs limites d'exposition du public sont basées sur une recommandation de l'Union européenne et sur les lignes directrices de la Commission internationale de protection contre les radiations non ionisantes (ICNIRP) établies en 1998 (67). Elles ont pour objectif d'apporter aux populations « un niveau élevé de protection de la santé contre les expositions aux champs électromagnétiques ».

Les valeurs limites instantanées, à ne pas dépasser aux endroits où « le public passe un temps significatif », sont les suivantes :

- 5 000 volt/m pour le champ électrique ;
- 100 micro-Tesla pour le champ magnétique.

8.2 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions chimiques

La méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine des émissions chimiques est conforme à la note du ministère du 22 février 2019 (21) relative à la prise en compte des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact des infrastructures routières. Elle suit également les dispositions du guide de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) sur l'établissement d'une évaluation des risques sanitaires d'un projet industriel (« Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires : démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées » (20)) et celles de la circulaire du 9 août 2013 de la Direction générale de la prévention des risques et la Direction générale de la santé (68).

Le guide Ineris est notamment utilisé pour les installations classées en projet ; par extension, l'Andra a retenu de l'utiliser pour l'évaluation des expositions humaines liées aux émissions chimiques de ses centres de stockage et aux risques sanitaires associés.

Les résultats obtenus à chaque étape permettent de considérer à la fois les émissions de l'installation, les moyens de les réduire, le contexte environnemental et populationnel et les risques sanitaires attribuables.

L'évaluation des risques sanitaires du projet global Cigéo porte essentiellement pour les émissions atmosphériques sur les poussières, les oxydes d'azote, les oxydes de soufre, le monoxyde de carbone et les composés organiques volatils. Les méthodes qui ont successivement permis d'évaluer l'exposition des populations et de caractériser les risques associés sont présentées dans les chapitres qui suivent. Les méthodes de détermination des émissions de polluants et de leur dispersion dans l'air sont quant à elles présentées dans les chapitres 2 des volumes IV et VII de la présente étude d'impact.

Pour les émissions liquides, l'évaluation des risques sanitaires concerne les substances toxiques chimiques contenues dans les eaux rejetées dans les ruisseaux de l'Orge, l'Ormançon et la Bureau : arsenic, benzo(a)pyrène, cadmium, chrome, cuivre, plomb, mercure, nickel, sélénium, zinc et uranium. Les méthodes qui ont successivement permis de déterminer l'exposition des populations et de caractériser les risques associés sont présentées dans les chapitres qui suivent. Les méthodes de détermination des émissions de polluants et de leur dispersion dans l'air sont quant à elles présentées dans les chapitres 2 des volumes IV et VII de la présente étude d'impact.

8.2.1 Méthode d'évaluation de l'exposition des populations

Pour l'évaluation de l'exposition humaine, le code de la santé publique impose de considérer le(s) groupe(s) d'individus le(s) plus particulièrement exposés à ladite « source ».

Les émissions chimiques atmosphériques dans l'aire d'étude rapprochée du centre de stockage Cigéo, incluent les émissions de la zone puits, de la zone descenderie, de la liaison intersites, de la déviation de la route départementale D60/960 et de l'installation terminale embranchée, et les émissions engendrées par l'augmentation de trafic liée au projet global Cigéo. Les émissions chimiques atmosphériques au niveau de la ligne ferroviaire 027000 et de l'installation terminale embranchée sont beaucoup plus faibles avec un trafic très limité, au maximum de huit passages de train maximum par jour (cf. Chapitre 12.1.2.3 du volume IV de la présente étude d'impact). Les populations à proximité de ces voies mais éloignées du centre de stockage Cigéo sont beaucoup moins exposées, et le risque sanitaire associé est encore plus faible.

Ainsi, les populations retenues pour l'évaluation des incidences des émissions chimiques du projet global Cigéo sont, compte tenu de la nature et de la quantité des émissions, celles qui se trouvent être les plus proches du centre de stockage Cigéo, à savoir celles de : Bonnet, Gillaumé, Saudron, Mandres en Barrois, Ribeaucourt et Bure, ainsi que les individus fréquentant l'hôtel-restaurant du Bindeuil (établissement recevant public) et de l'école d'Échenay (établissement recevant une population vulnérable).

Deux voies d'exposition sont à considérer :

- l'inhalation, qui prend en compte tous les éléments qui pénètrent dans l'organisme par contact avec les voies respiratoires ;
- l'ingestion qui prend en compte tous les éléments qui pénètrent dans l'organisme par contact avec les voies digestives.

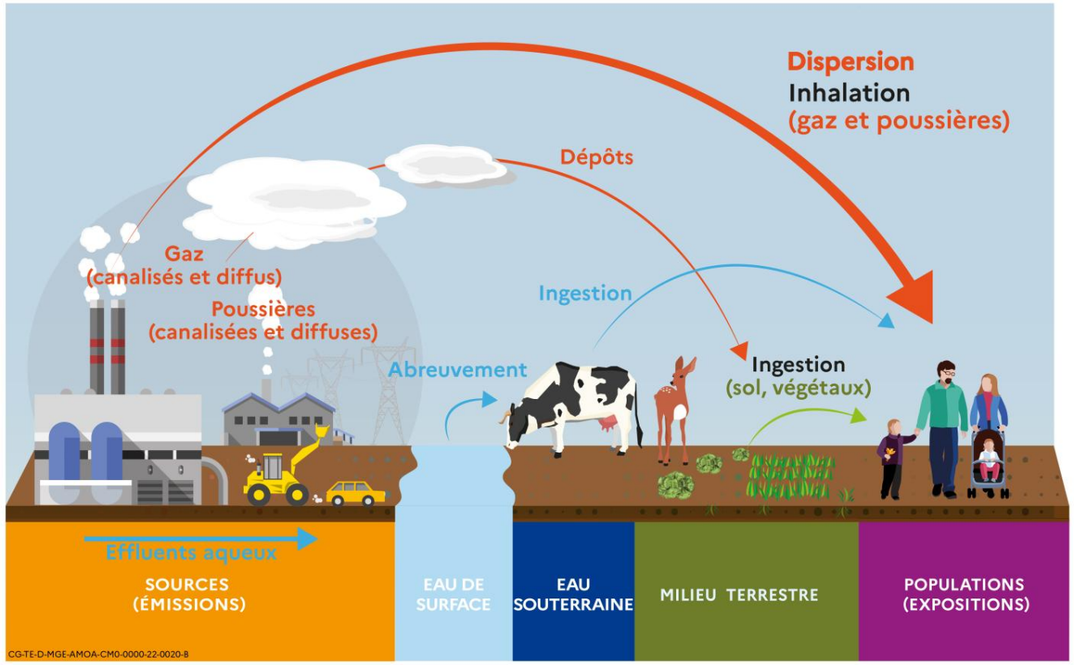


Figure 8-1 Voies de transfert et d'exposition des émissions chimiques

Les calculs d'exposition humaine liée aux émissions chimiques atmosphériques sur la santé sont réalisés avec des hypothèses majorant les résultats :

- les populations (adultes et enfants) séjournent 24 heures sur 24 heures, 7 jours sur 7 jours et 365 jours par an sur leur lieu de résidence (habitations et établissements), soit une fréquence d'exposition aux émissions égale à 1 ;
- la concentration inhalée de composés chimiques correspond à la concentration atmosphérique estimée par modélisation au niveau des lieux de résidence.

L'exposition humaine correspond aux concentrations atmosphériques moyennes annuelles des composés chimiques inhalées par les populations retenues. Ces concentrations inhalées (notée CI), exprimées en µg.m^{-3}, sont calculées selon l'équation suivante :

$$CI = C \times F$$

Avec :

- C : concentration atmosphérique du composé toxique en µg.m^{-3} ; il s'agit de la concentration au niveau de la localisation des populations ;
- F : taux d'exposition (nombre annuel d'heures ou de jours d'exposition ramené au nombre total annuel d'heures ou de jours). Dans la présente étude, F est considéré égal à un.

Pour l'ingestion, l'exposition est exprimée par la dose journalière d'exposition (DJE) calculée en fonction des quantités de matrices (sol, eau, aliments) ingérées et impactées par les émissions de l'installation, des concentrations de polluants dans les matrices, et du poids de l'individu considéré.

La DJE est calculée pour chaque scénario, selon l'équation :

$$DJE = \frac{\sum_i Q_i \times C_i \times f_i}{P}$$

avec :

DJE : dose journalière d'exposition liée à l'ingestion de la substance, en mg/kg pc/jour ;

Q_i : quantité de matrice i (sol, eau, aliments…) ingérée par jour, en kg/j ou l/j (moyenne annuelle) ;

F_i : fraction de la quantité de matrice i ingérée et exposée à la contamination étudiée (souvent assimilée au taux d'autoconsommation ou la part de consommation de produits locaux) ;

C_i : concentration de la substance dans la matrice i ingérée, en mg/kg ou mg/l ;

P : masse corporelle de l'individu (kg pc).

8.2.2 Méthode d'analyse des risques sanitaires pour une exposition par inhalation

Conformément à la méthodologie recommandée par l'Ineris (20), le risque sanitaire est estimé, en évaluant, à l'aide des valeurs toxicologiques de référence relatives aux substances étudiées, soit des quotients de danger (QD) dans le cas des substances avec effet de seuil (substances non cancérogènes), soit des excès de risque individuel (ERI) dans le cas des substances sans effet de seuil (substances cancérogènes).

L'évaluation du risque sanitaire est réalisée à l'aide des valeurs toxicologiques de référence (VTR). L'appellation VTR regroupe toutes les relations quantitatives entre une dose et l'apparition d'un effet lié à une exposition aiguë ou à une exposition chronique continue ou répétée dans le temps (effets à seuil), ou entre une dose et une probabilité d'effet (effets sans seuil). La VTR pour les effets sans seuil est appelée « Excès de Risque Unitaire » (ERU).

Le quotient de danger (QD), en présence d'effet à seuil, pour l'inhalation, est calculé à partir de la concentration (CI) comme suit :

$$QD = \frac{CI}{VTR_{inh}} \text{ ou } QD = \frac{DJE}{VTR_{ing}}$$

avec :

VTR_{inh}: valeur toxicologique de référence, à seuil, pour la voie inhalation ;

VTR_{ing} : valeur toxicologique de référence, à seuil, pour la voie ingestion.

En termes d'interprétation, lorsque le QD est inférieur à 1, la survenue d'effet toxique apparaît peu probable même pour les populations sensibles. Au-delà de 1 la possibilité d'apparition d'effets ne peut être exclue.

L'excès de risque individuel (ERI), en présence d'effets sans seuil, pour l'inhalation, est calculé à partir de la concentration (CI), le temps d'exposition (Ti) et la durée de vie (Tm) comme suit :

$$\mathrm{ERI} = \frac{\sum_{i=0}^{n} CIi \times Ti}{\mathrm{Tm}} \times \mathrm{ERU}_{inh}$$

avec :

i = période d'exposition ;

ERU_{inh} : excès de risque unitaire pour la voie inhalation.

L'excès de risque individuel (ERI), en présence d'effets sans seuil, pour l'ingestion, est calculé à partir de la dose journalière d'exposition (DJE), le temps d'exposition (Ti) et la durée de vie (Tm) comme suit :

$$\mathrm{ERI} = \sum_{\mathrm{i=0}}^{\mathrm{n}} \mathrm{DJE} \times \frac{\mathrm{Ti}}{\mathrm{Tm}} \times \mathrm{ERU}_{\mathrm{ing}}$$

ERU_{ing}: excès de risque unitaire pour la voie ingestion.

Pour les effets sans seuil, les expositions sont rapportées sur la vie entière (conventionnellement n=F70 ans) et pour rappel, l'ERU est la valeur toxicologique de référence pour les effets sans seuil.

Le niveau de risque cancérigène a été comparé à un risque de 1 pour 100 000 (ou 10^{-5}), niveau repère retenu par différentes instances internationales en dessous duquel, les risques sont par convention considérés comme non préoccupants (proposition du Haut conseil de la santé publique en France, 2010 (69)) pour la gestion des risques environnementaux). En termes d'interprétation, un excès de risque individuel de 10^{-5} correspond à une probabilité additionnelle inférieure à 0,001 % de développer un cancer au cours de sa vie.

La recherche des valeurs toxicologiques de référence (VTR) suit les recommandations de la note d'information DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués (70).

En France, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et travail (Anses) a pour mission d'élaborer des VTR. Sont retenues en priorité, les VTR construites par l'Anses.

Lorsque l'Anses ne fournit pas de VTR pour certains composés étudiés, si une expertise nationale a été menée et a abouti à un choix, celui-ci est retenu sous réserve que cette expertise ait été réalisée postérieurement à la date de parution de la VTR la plus récente.

Les valeurs toxicologiques de références (VTR) des substances d'intérêt retenues ont été recherchées auprès des organismes spécialisés qui les établissent. Il s'agit de :

- l'ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail ;
- l'US-EPA : *Environmental Protection Agency* ;
- l'ATSDR : *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* ;
- l'OMS : Organisation mondiale de la santé ;
- la *Health Canada* : Santé Canada ;
- le RIVM : Institut national de santé publique et de l'environnement des Pays-Bas ;
- l'OEHHA : *Office of Environmental Health Hazard Assessment* ;
- l'EFSA : *European Food Safety Authority*.

Pour les substances chimiques ne possédant pas de valeur toxicologique de référence (VTR, ERU), les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine sont comparés aux valeurs réglementaires (valeurs limites pour la protection de la santé humaine) ou de référence (objectifs de qualité de l'air) disponibles pour le risque.

8.2.3 Analyse de sensibilité de l'évaluation aux incertitudes

L'analyse de la sensibilité aux incertitudes est menée sur chaque étape de l'évaluation.

8.2.3.1 L'analyse des incertitudes sur les émissions chimiques atmosphériques

Les émissions provenant des gaz d'échappement et du roulage des véhicules tiennent compte des années du projet global Cigéo les plus fortement émettrices de composés dans l'air en lien avec le nombre de véhicules circulant et les kilomètres parcourus par an. Les estimations les plus fortes sont supposées constantes pendant toute la durée des phases considérées, alors que la circulation des véhicules et engins fluctue d'une année à l'autre pendant la phase de construction initiale ou la phase de fonctionnement. Ce choix est majorant pour évaluer les niveaux d'exposition liés à la circulation des véhicules.

Le calcul des émissions de poussières à l'intérieur du centre de stockage Cigéo (roulage de véhicules ou envols de poussières pour les émissions surfaciques) est effectué à partir d'un nombre de jours de pluie estimé à 127 jours en moyenne par an (nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 1 mm de pluie) sur la période 2020 à 2024. Le calcul des flux d'émissions associés à la circulation sur la liaison intersites et en dehors du centre de stockage Cigéo (routes départementales) est basé sur un nombre de jours de pluie estimé à 148 jours par an (nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 0,254 mm) sur la période de 2020 à 2024). Cette différence de 21 jours de pluie génère des variations d'estimations de flux d'émissions inférieures à 5 % des poussières (PM2,5 et PM10) qui sont considérées comme négligeables au regard des calculs de risque. Les émissions de poussières issues du roulage des engins sur les zones puits et descenderie ont été considérées comme négligeables en dehors de la zone de stockage des verses (vitesse réduite, déplacement limité, roulage majoritaire sur des plateformes bétonnées ou sols calcaires). Par conséquent, elles n'ont pas été retenues dans la modélisation de dispersion atmosphérique.

Pour les émissions canalisées, les valeurs d'émission retenues sont considérées, de façon pénalisante, aux maximums des valeurs limites d'émission fixées dans les arrêtés de prescriptions générales des installations classées pour l'environnement (cas pour les chaudières et les centrales à béton). Pour les rejets de ventilation de la descenderie de service et des puits (hors ventilation nucléaire), les valeurs maximales admissibles par le code du travail ont été retenues dans les évaluations, de façon majorante (prise en compte du décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 porte maintenant la VLEP à 4 µg/m3 (71)).

Pour les émissions canalisées, en dehors des chaudières et des centrales à béton, et les émissions linéiques sur le centre de stockage Cigéo, les poussières totales ont été assimilées à des particules fines de 10 µm et 2,5 µm de diamètre appelé respectivement PM10 et PM2,5. Ce choix est majorant en termes d'évaluation de l'exposition aux poussières, en particulier pour les PM2,5.

Les composés organiques volatils (COV) et les hydrocarbures provenant des gaz d'échappement des véhicules sont partiellement assimilés à du benzène qui présente des dangers bien connus à seuil et sans seuil de dose. Les COV émis font partie des hydrocarbures imbrûlés de la combustion de carburant. D'un point de vue quantitatif, un taux de 5 % a été appliqué sur le total des composés organiques volatils. Ce choix est majorant par rapport à la réglementation en vigueur sur les teneurs maximales en benzène utilisé comme additif dans les carburants qui ne doit pas dépasser 1 % depuis le 1er janvier 2000 (cf. Directive n° 98/70/CE du 13 octobre 1998 concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel et modifiant la directive 93/12/CEE du Conseil (72)). À noter que la teneur moyenne actuelle en benzène dans les carburants atteint 2 % environ et que les quantités de benzène dans les gaz d'échappement sont réduites grâce aux pots catalytiques. Cette proportion (benzène/HC <2,3 %) est confirmée par les flux calculés par le logiciel logiciel AirAdvanced® Map - TREFIC pour la circulation en dehors des zones descenderie et puits du centre de stockage Cigéo. Par conséquent, la prise en compte d'un taux de 5 % de benzène dans les gaz d'échappement reste un choix majorant.

En ce qui concerne les chaudières biomasse qui sont sources d'émissions de composés organiques volatils COV, la proportion de benzène de 25 % dans les COV a été retenue basée sur les dernières estimations à notre disposition.

Pour les sources d'émissions autres que les gaz d'échappement et les chaudières, le choix très majorant a été d'assimiler la totalité des hydrocarbures et des COV au benzène. Les évaluations n'ont pas été menées spécifiquement sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ces HAP proviennent essentiellement du chauffage industriel ainsi que du transport routier. Les chaudières présentes sur le centre de stockage Cigéo utiliseront le bois et le gaz comme combustibles. L'arrêté ministériel du 3 août 2018 modifié relatif aux installations 2910 solumises à déclaration (73) n'indique pas de valeur limite d'émission spécifique aux hydrocarbures aromatiques polycycliques pour le chauffage industriel. Les flux de HAP provenant de ces installations n'ont pas pu être quantifiés.

8.2.3.2 L'analyse des incertitudes sur les rejets chimiques liquides

Les valeurs de rejets liquides chimiques retenues dans les évaluations de risque correspondent à une qualité des eaux qui est compatible avec les objectifs de qualité attribués au cours d'eau récepteur, soit le bon état écologique et chimique. En effet, l'hypothèse de base est de considérer que les cours d'eau qui recevront les eaux traitées se retrouveront en période d'assec, donc sans aucun volume d'eau naturelle pour diluer ces effluents. Par conséquent, les eaux conventionnelles traitées représenteront, au moins une fois dans l'année, 100 % de l'eau des ruisseaux, donc sans dilution de l'eau de surface.

Ce choix est majorant car les études de conception des systèmes de traitement pour les eaux de ruissellement des verses, les eaux usées et les eaux de fond se poursuivent et pourraient conduire à limiter la concentration de substances toxiques chimiques dans les rejets du centre de stockage Cigéo.

8.2.3.3 L'analyse des incertitudes sur la dispersion atmosphérique

Les modèles 2D appliqués par le logiciel de dispersion atmosphérique AirAdvanced® Map version standard développé par ARIA Technologie (44) sont des modèles de type gaussien. Ils mettent en jeu un ensemble d'hypothèses permettant de reproduire de manière simplifiée le phénomène de dispersion Tous les modèles gaussiens, peuvent être utilisés pour la modélisation autour de sites situés dans des reliefs peu accidentés et sur lesquels les conditions météorologiques sont homogènes. Le logiciel AirAdvanced® Map version standard est un outil de référence de nombreuses installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Les résultats sont valables pour des distances supérieures à 100 mètres du point d'émission, notamment en cas de présence de bâtiments. Par ailleurs, au-delà de la dizaine de kilomètres, les résultats présentent plus d'incertitudes car d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion peuvent être considérés. Les calculs présentés se situent dans le domaine de validité des modèles à savoir dans la fourchette de distance 100 m – 10 km. La pertinence des modèles gaussiens n'est pas remise en cause, cependant, il est important de signaler que les résultats obtenus par différents logiciels de simulation (ADMS, IMPACT…) représentent environ un ordre de grandeur d'incertitudes dans l'évaluation des concentrations massiques des polluants conventionnels, ce qui ne remet pas en cause les conclusions de l'évaluation des risques sanitaires.

8.2.3.4 L'analyse des incertitudes sur l'exposition humaine

Il a été retenu un scénario correspondant à la présence de population 24 heures sur 24 heures, 365 jours par an pour la voie inhalation. Une durée d'exposition sur la vie entière a été considérée (Ti = Tm) pour les voies inhalation et ingestion. Ces scénarios ne sont peut-être pas représentatifs de la population de l'aire d'étude qui peut être amenée à quitter l'aire d'étude régulièrement pour le travail ou les vacances par exemple. Toutefois cette hypothèse très majorante permet de prendre en compte les cas extrêmes pouvant exister au sein de la population (personnes âgées peu mobiles par exemple, agriculteurs locaux).

8.2.3.5 L'analyse des incertitudes sur le risque sanitaire

Les poussières émises par les travaux de creusement et le stockage des verses sont susceptibles de contenir des constituants minéralogiques pouvant présenter un danger pour la santé. Une analyse de risque spécifique des poussières issues des verses a été réalisée à partir de leurs compositions (cf. Annexe 1 du présent volume de l'étude d'impact). Cette analyse montre que les évaluations des risques chimiques effectuées pour les poussières (PM2,5 et PM10) sont suffisantes pour gérer les risques liés à la dispersion atmosphérique des constituants minéralogiques contenus dans les verses.

Les valeurs toxicologiques de référence utilisées comme indicateur pour les risques liés aux rejets chimiques sont basées sur des résultats d'études expérimentales (études animales) ou épidémiologiques. Des facteurs d'incertitudes sont utilisés pour majorer les résultats des études à l'origine leurs estimations.

Contrairement à de nombreuses substances chimiques, l'Anses indique une absence de consensus sur les niveaux de risque acceptable lié aux particules de l'air ambiant pour les PM2,5. La valeur repère de 10^{-5} au-dessous de laquelle il est généralement admis que le risque devient acceptable pour les effets sans seuil n'est pas proposée pour la VTR des PM2,5 (28). Pour le projet global Cigéo, le risque associé aux PM2,5 a été jugé acceptable au regard des niveaux de risque calculés à partir des expositions associées aux valeurs guides de l'OMS (29) ou aux plus faibles concentrations observées pour les particules de l'air ambiant en France. De plus, les estimations des concentrations des PM2,5 induites par le projet global Cigéo sont très inférieures au niveau recommandé par l'OMS (5 µg/m³). Cette comparaison conforte la conclusion que le risque associé aux PM2,5 reste non préoccupant pour les populations (29).

Les polluants chimiques peuvent interagir les uns par rapport aux autres. Si la connaissance des effets sur la santé liée à l'inhalation de chacun d'entre eux a beaucoup avancé, ce n'est pas encore le cas d'un ensemble de polluants. Il est donc impossible de savoir si leurs effets sanitaires sont antagonistes, synergiques ou additifs.

Pour la voie inhalation, les effets additifs à seuil du monoxyde de carbone, du benzène et du benzo(a)pyrène n'ont pas été calculés. Les risques sanitaires associés à ces trois polluants sont très faibles. Les valeurs toxicologiques de référence de ces deux polluants concernent des effets et des organes cibles différents. Aucun risque sanitaire lié à un effet additif de ces polluants n'est redouté.

De même pour la voie ingestion, les effets additifs à seuil des composés chimiques n'ont pas été calculés. Les risques sanitaires des douze traceurs de risque retenus (arsenic, cadmium, chrome III, chrome VI, cuivre, mercure inorganique, mercure organique, nickel, plomb, sélénium, uranium et zinc) sont très faibles. La somme des quotients de danger de tous les traceurs de risque serait inférieure à 1 pour toutes les classes âges étudiées (enfant d'un an, enfant de 10 ans et adulte).

8.2.4 Conclusion

L'analyse de sensibilité à ces incertitudes, restituées dans le tableau 8-1 ci-dessous, vise à vérifier la fiabilité des évaluations réalisées.

Tableau 8-1 Analyse de sensibilité aux incertitudes sur l'évaluation des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine

Étape	Hypothèse retenue	Commentaire	Incertitude
Définition des émissions	Détermination des agents chimiques dangereux à partir d'une analyse exhaustive des sources d'émissions : verses, engins et véhicules de circulation, chaudières, centrale à béton, etc.	Caractérisation des émissions possibles en regard de la réglementation et de l'analyse bibliographique Les hypothèses les plus pénalisantes ont été retenues	Faible
	Valeurs de rejet liquides compatibles avec les objectifs de qualité attribués au cours d'eau récepteur, soit le bon état écologique		
	Utilisation de composés traceurs	Comportement identique à la famille de composés chimiques pour l'évaluation des risques	Faible
Modélisation de la dispersion atmosphérique	Code de dispersion gaz et aérosols	Code robuste au niveau national et utilisé dans leurs limites d'utilisation, avec calage des écarts type de dispersion basés sur des expérimentations réelles (Pasquill-Turner)	Faible
Définition des populations exposées	Groupes de population : adulte Temps d'exposition (24 h/24 h, 7 jours sur 7 jours et 35 jours pendant 70 ans) Durée d'exposition vie entière	Les indicateurs de risques (VTR) ne sont définis que pour l'adulte pour les composés chimiques. Hypothèse d'exposition majorante	Faible
Caractérisation du risque sanitaire	Risque sanitaire des constituants minéralogiques des poussières issus des verses	L'objectif de qualité du PM10 et la VTR du PM2,5 permettent de gérer les risques associés aux constituants minéralogiques des poussières issus des verses	Faible
	Valeurs de référence pour le risque systémique Valeurs de référence pour le risque cancérogène	Les facteurs d'incertitude sont intégrés dans les valeurs de référence. En leur absence, les valeurs réglementaires ou de gestion ont été utilisées pour la caractérisation qualitative des risques	Faible sur les paramètres disposant de valeurs de référence
	Utilisation des indicateurs de risque conformément au guide Ineris, pour les effets à seuil et sans seuil	Conclusion de la démarche conforme de l'évaluation du risque sanitaire. Les facteurs d'incertitude sont intégrés dans la démarche	Faible

Les incertitudes sont globalement faibles et compensées par des hypothèses majorantes sur les estimations des émissions, des expositions humaines, conférant une bonne fiabilité des résultats de l'évaluation des incidences sur la santé humaine et du risque sanitaire associé.

8.3 Méthodes d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions radiologiques

La démarche d'évaluation des rejets atmosphériques est présentée dans le volume VII de la présente étude d'impact.

La démarche générale d'évaluation des incidences des émissions radiologiques et du risque sanitaire associé comporte plusieurs étapes (cf. Figure 8-2) :

- l'évaluation des émissions radioactives ;
- l'évaluation de la dispersion de ces émissions, appelées « rejets » lorsqu'elles sont canalisées, dans l'air ou dans l'eau ;
- la modélisation des transferts de radionucléides dans l'environnement et la chaîne agro-alimentaire ;
- l'évaluation de l'exposition humaine, en tenant compte des différentes voies d'exposition ;
- la caractérisation du risque sanitaire, en comparant l'exposition humaine à des valeurs seuils.

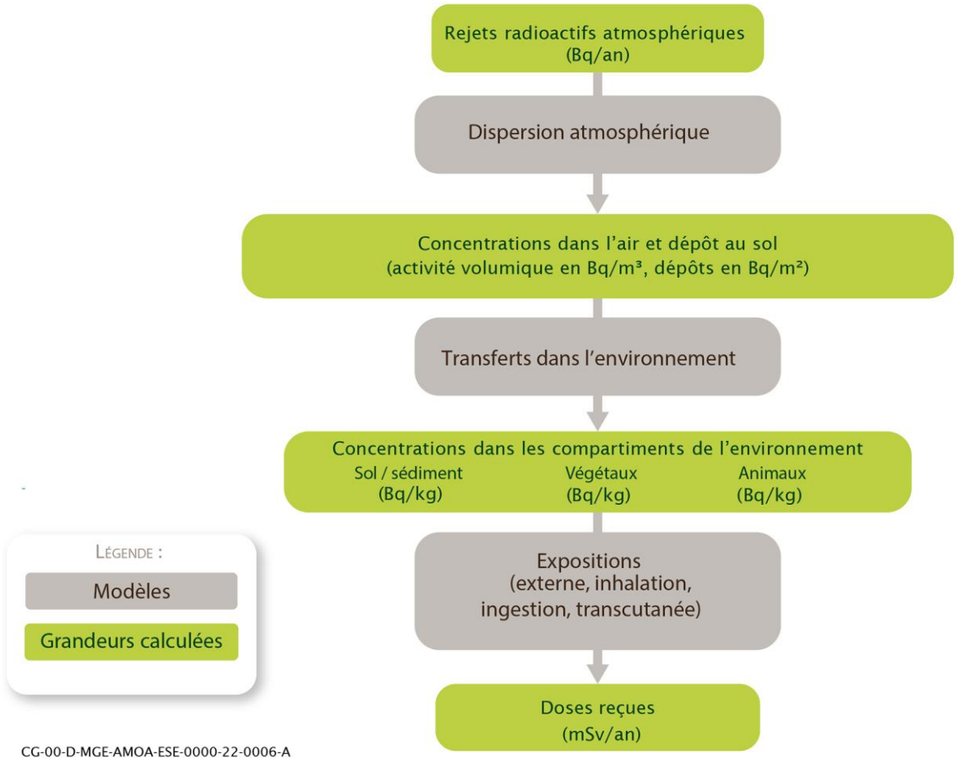


Figure 8-2 *Démarche générale d'évaluation des incidences radiologiques et du risque sanitaire associé*

L'évaluation des incidences liées à des rejets liquides radioactifs n'est pas traitée ici pour le projet global Cigéo compte tenu du fait que les dispositions de gestion des eaux du projet global Cigéo permettent d'éviter un rejet local (cf. Chapitre 2.7.4.5 du volume II de la présente étude d'impact).

8.3.1 Méthode d'évaluation de l'exposition humaine

L'annexe 2 du présent volume présente en détail les valeurs de paramètres entrées dans le module Gascon de la plateforme CERES, utilisé pour les calculs.

8.3.1.1 Populations exposées retenues

Pour l'évaluation de l'exposition humaine, le code de la santé publique recommande de considérer le groupe d'individus le plus particulièrement exposés à ladite « source ».

L'article R. 1333-23 du code de la santé publique reprend la demande de réalisme pour la caractérisation des expositions en indiquant que « Toute estimation de doses auxquelles la population est exposée prend en compte les doses résultant de l'exposition externe aux rayonnements ionisants et de l'incorporation de radionucléides. Elle est calculée pour une personne représentative, selon des scénarios aussi réalistes que possible ».

Pour l'évaluation de l'impact des rejets atmosphériques, la démarche de la localisation et la sélection des groupes retenus reposent sur la prise en compte des groupes de référence locaux les plus exposés à savoir les populations situées à proximité du site et sous les vents dominants. Les phénomènes météorologiques à prendre en compte dépendent de la dimension du domaine étudié. Dans la majorité des cas traités dans le domaine industriel, l'échelle spatiale ne dépasse pas quelques kilomètres, au plus une dizaine (Ineris, 2002 (74)). Le General *Safety Guide* n° 10 de l'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA) (75) indique, qu'en général, les modèles gaussiens de dispersion atmosphérique sont utilisés et valables pour calculer les doses des individus représentatifs recevant les plus fortes doses, habitant à moins de 10-20 km du point d'émission. Le retour d'expérience des calculs menés pour les scénarios accidentels envisagés sur d'autres installations de stockage montre que les activités volumiques et dépôts au sol maximaux sont toujours mesurés ou calculés à l'intérieur d'un rayon de quelques kilomètres autour du point de rejet atmosphérique, une aire d'étude d'un diamètre d'environ 10 km, centrée sur le(s) point(s) de rejet est pris en compte. Les villages jouxtant les zones d'implantation ont été étudiés.

La population retenue pour l'étude des effets des rejets radioactifs atmosphériques du centre de stockage Cigéo est, compte tenu de la nature et de la quantité des émissions, ainsi que des conditions météorologiques locales, celle qui se trouve être la plus proche : Bure, qui se trouve à proximité à la fois de la zone puits et de la zone descenderie. Les calculs montrent que les populations plus éloignées sont moins exposées.

L'exposition aux émissions radioactives dépend des habitudes de vie des individus. Elle est calculée pour l'adulte (17 ans et plus), l'adolescent de 10 ans (représentatif de la tranche 6 ans à 15 ans) et l'enfant de 1 an à 2 ans. Par ailleurs, de façon pénalisante, on considère un taux de présence des individus sur le lieu d'exposition égal à 100 % et un air à l'intérieur des habitations identique (les mêmes caractéristiques radiologiques) que l'air extérieur.

Les consommations alimentaires des populations résidentes sont représentatives d'activités actuellement observées dans la région concernée du centre de stockage Cigéo. Ces populations, définies comme un groupe « multi-activités », représente le groupe de référence incluant l'ensemble des voies d'exposition liées à ses multiples activités. Les consommations alimentaires de ce groupe multi-activités proviennent d'une enquête locale réalisée en 2013 sur le territoire de Meuse-Haute-Marne (45). Sont prises en compte dans l'évaluation de l'exposition toutes les denrées alimentaires susceptibles d'être produites localement (le complément de la ration, non produit localement, n'est pas impacté par les émissions radioactives).

Les données de débit respiratoire ne sont pas dépendantes du site contrairement aux habitudes alimentaires et au budget temps (habitudes de vie). Les débits respiratoires moyens sur la journée, données d'entrée de CERES, sont calculés à partir des temps passés et débits respiratoires par activité et par classe d'âge proposés par la Commission internationale de protection radiologique, CIPR Publication 89 (27). Les valeurs sont présentées dans le tableau présenté ci-après.

Tableau 8-2 Débits respiratoires et budgets temps selon l'activité et la classe d'âge (CIPR Publication 89 (27))

Activité	Adulte : Homme		Enfant : 10 ans		Enfant : 1 an	
	Temps passé	Débit respiratoire	Temps passé	Débit respiratoire	Temps passé	Débit respiratoire
	h/jour	m³/h	h/jour	m³/h	h/jour	m³/h
Sommeil	8	0,45	10	0,31	14	0,15
Assis	6	0,54	4,7	0,38	3,3	0,22
Activité légère	9,8	1,5	9,3	1,1	6,7	0,35
Activité forte	0,25	3	0	2,2	0	Non applicable
Moyenne	24	0,9	24	0,6	24	0,2

L'évaluation de l'exposition humaine doit également tenir compte de l'activité accumulée dans le temps, essentiellement dans les sols, et ses conséquences dans l'environnement. Elle est évaluée sur un an et sur une centaine d'années correspondant à la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

8.3.1.2 Voies d'exposition humaine

L'Homme est susceptible d'être exposé aux émissions radioactives (cf. Figure 8-3) :

- soit de façon directe :
  - ✓ par exposition externe aux rayonnements ionisants des radionucléides présents dans l'air (gaz et particules) ou les dépôts au sol ;
  - ✓ par inhalation de l'air contenant des radionucléides (gaz et particules) ;
  - ✓ par incorporation transcutanée de tritium.

Soit de façon indirecte : par ingestion d'aliments (produits végétaux et animaux) dans lesquels sont présents des radionucléides issus du transfert par voie atmosphérique sur leur ration alimentaire (céréales, herbe, foin).

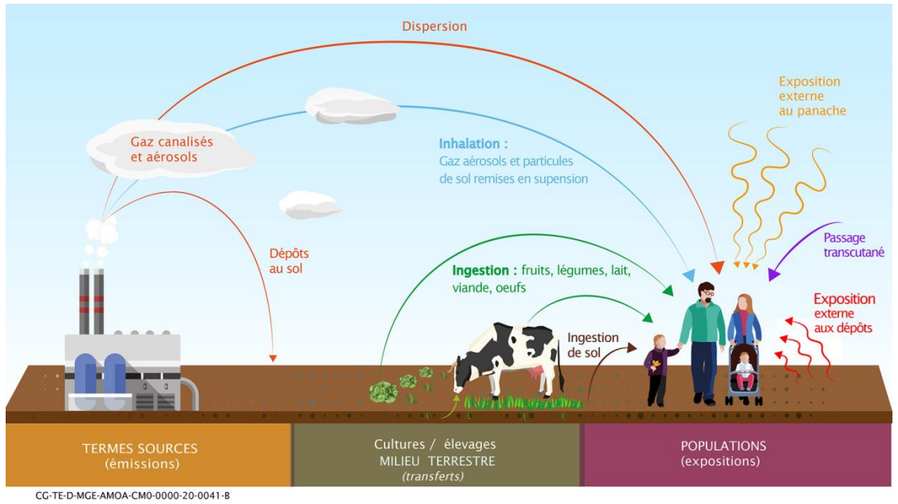


Figure 8-3 Voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques

Seules les expositions aux rejets des installations sont considérées. L'exposition externe directe à la source, à savoir les colis de déchets radioactifs, est négligeable du fait de l'éloignement des populations et des dispositifs de protection mis en place (emballages de transports, génie civil et cellules blindées des installations de surface…).

Les modèles utilisés pour le transfert dans la biosphère sont des modèles déterministes (et non probabilistes) c'est-à-dire qu'ils utilisent une valeur unique, en général la moyenne des valeurs associées à un paramètre, et non la distribution des valeurs du paramètre par l'intermédiaire d'une loi de probabilité de distribution. Les valeurs de facteurs de transfert dans la biosphère sont issues de la publication IAEA de 2010 *Technical Reports Series* n° 472 (76).

Dans le cas d'émission de tritium, les voies d'exposition considérées sont légèrement différentes :

- l'immersion dans le panache conduit à une exposition interne par inhalation et par passage transcutané ;
- le tritium étant un émetteur β pur, il ne conduit pas à une exposition externe par les dépôts ; en raison de la mobilité du tritium dans les sols, l'effet d'accumulation dans le sol est très faible et est négligé ;
- comme les autres radionucléides, il conduit par transferts foliaires dans la chaîne alimentaire, à une contamination par ingestion.

Les incidences sur la qualité de l'air sont modélisées à l'aide d'un outil de calcul choisi en référence, CERES (code d'évaluations rapides environnementales et sanitaires) développé et utilisé par le CEA (43). L'avantage de cet outil est qu'il couple le modèle de dispersion atmosphérique avec le modèle de transferts au travers des chaines agro-alimentaires vers l'homme et donc permet de calculer les doses directement à partir des rejets.

Par ailleurs, afin de localiser le maximum de concentration des émissions atmosphériques radioactives calculée dans l'air sur le domaine d'étude du modèle de dispersion atmosphérique, un autre logiciel que CERES a été utilisé. Il s'agit de l'outil IMPACT développé par ARIA Technologies (77). IMPACT modélise uniquement la dispersion atmosphérique, et possède des fonctions supplémentaires telles que localiser un maximum de concentration sur le domaine d'étude et cartographier le panache issu de la modélisation.

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

8.3.1.3 Évaluation des expositions humaines

Dans le module de calcul d'impact radiologique dosimétrique couplé à GASCON® implanté dans la plateforme CERES® (42), toutes les voies d'exposition sont implémentées :

- irradiation (ou exposition) externe par le panache ;
- irradiation (ou exposition) externe par le dépôt ;
- inhalation ;
- dose par passage transcutané pour le tritium (HTO) ;
- ingestion de productions agricoles, végétales et animales, contaminées par le rejet.

Des modèles spécifiques existent pour le calcul de l'impact dû aux rejets de tritium ou du ^{14}C émis sous forme de gaz.

Toutes les données nécessaires au calcul des transferts dans la chaîne alimentaire, propres au site étudié, sont disponibles en base de données lorsque les calculs sont réalisés dans la plateforme CERES®.

La radioactivité intégrée dans le temps, exprimée en $Bq.s^{-1}.m^{-3}$, est calculée en tous points du domaine d'étude. Elle s'obtient en multipliant l'activité moyenne par la durée du rejet (un an). Cette activité sert directement au calcul de la dose par irradiation externe par le panache ainsi que de la dose par inhalation.

Pour évaluer l'exposition humaine aux rejets atmosphériques chroniques, émis à débit constant en fonctionnement normal, on calcule une dose annuelle, après une ou plusieurs années de fonctionnement, exprimée en mSv/an.

Les coefficients de dose, permettant de passer du Bq au Sv, étant fonction de l'élément radioactif, les doses sont évaluées à partir des résultats de dispersion relatifs à chaque élément radioactif. On effectue ensuite les sommations sur l'ensemble des radionucléides présents dans les résultats de dispersion atmosphérique (émissions et filiations éventuelles) :

- **dose due à l'irradiation externe par le panache**

  La dose par irradiation externe dans le panache peut être due à l'ensemble des radionucléides présents dans le panache, qu'il s'agisse de gaz, de vapeurs ou d'aérosols. Seuls les radionucléides émetteurs bêta purs ne contribuent pas à cette dose. La dose efficace par exposition externe au panache est le produit de l'activité intégrée sur la durée d'exposition (dépendant du budget temps) par le coefficient de dose pour l'élément radioactif considéré.

  Dans la plateforme CERES® radiologique, dans laquelle le code GASCON® est implanté, les coefficients de dose pour l'irradiation externe proviennent du rapport de l'US-EPA (34). Cette référence a été mise à jour en 2019 et la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements ionisants (CIPR) a publié en 2020 des valeurs de coefficients de dose. Ces nouvelles valeurs ne modifient pas les résultats présentés puisque la dose est principalement due à l'ingestion de carbone 14 ;

- **dose efficace par inhalation**

  La dose par inhalation est due aux aérosols et aux vapeurs présents dans le panache radioactif. Elle se calcule par le produit de l'activité inhalée, elle-même égale au produit de l'activité intégrée de l'air par le débit respiratoire de l'individu et par le coefficient de dose efficace par inhalation. Les coefficients de dose par inhalation utilisés dépendent de la taille des particules. Par défaut, le coefficient de dose utilisé pour les aérosols correspond à des particules de 1 µm. En effet, les valeurs indiquées dans l'arrêté du 16 novembre 2023 (37) pour les personnes du public sont celles correspondant à un diamètre de 1 µm.

  Les débits respiratoires utilisés sont estimés à partir des volumes d'air inhalés quotidiennement, intégrant les temps de veille et de sommeil. Dans la plateforme CERES®, les valeurs proposées proviennent de la Commission internationale de protection radiologique (78) et sont respectivement de 0,9 $m^3.h^{-1}$ pour l'adulte, de 0,6 $m^3.h^{-1}$ pour l'enfant âgé de 10 ans et de 0,2 $m^3.h^{-1}$ pour l'enfant âgé de 1 an à 2 ans ;

- **dose due à l'irradiation externe par les dépôts**

  Dans le cas de l'évaluation de l'impact des rejets émis en fonctionnement normal de façon supposée continue, on évalue l'impact après une ou plusieurs années de fonctionnement de l'installation.

  Le calcul de l'exposition externe s'effectue donc en considérant une exposition aux dépôts pendant un an. Comme l'activité au sol perdure, il peut être nécessaire de tenir compte de l'activité déposée les années antérieures et d'évaluer l'évolution de cette exposition à différents instants après le début du fonctionnement des installations. Le dépôt est intégré sur un an, entre l'année A et l'année précédente A^{-1}.

  Dans la plateforme CERES® radiologique, dans laquelle le code GASCON® est implanté, les coefficients de dose pour l'irradiation externe par le dépôt proviennent du Fédéral Guidance n° 12 (34). Cette référence a été mise à jour en 2019 et la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements ionisants (CIPR) a publié en 2020 des valeurs de coefficients de dose (36). Ces nouvelles valeurs ne modifient pas les résultats présentés puisque la dose est principalement due à l'ingestion de carbone 14 ;

- **transfert dans la chaine alimentaire (hors tritium et ^{14}C) et dose par ingestion**

  Seuls les aérosols et les vapeurs, hors tritium et carbone 14, peuvent être transférés dans la chaîne alimentaire. L'exposition interne de végétaux et de produits animaux peut se faire par voie dite « directe » ou par voie dite « indirecte ».

  La voie directe concerne les végétaux qui ont été contaminés par voie foliaire alors que la voie indirecte concerne les végétaux contaminés par voie racinaire.

  Pour les produits animaux, la voie directe correspond à la contamination de ces produits suite à l'ingestion, par les animaux, de végétaux contaminés par voie foliaire et la voie indirecte à l'ingestion de végétaux contaminés par voie racinaire.

  Dans un premier temps, on calcule l'activité des végétaux contaminés, soit « directement », par transfert foliaire lors du passage du panache, soit indirectement par transfert racinaire. Par la suite, on calcule l'activité dans les produits animaux (viande, lait…), provenant d'animaux ayant consommé des végétaux contaminés.

  Le modèle utilisé pour le ^{14}C émis sous forme de CO_2 et le modèle relatif au tritium sont différents des autres radionucléides et présentés dans les chapitres 8.3.1.4 et 8.3.1.5 du présent volume de l'étude d'impact.

L'activité des végétaux due aux transferts air-végétal résulte d'une contamination par « mode direct », c'est-à-dire l'exposition résultant du transfert d'un radionucléide directement de l'air à la partie foliaire des végétaux. Le dépôt sur les végétaux représente la fraction de dépôt total captée par le couvert végétal.

La captation sèche est essentiellement corrélée à l'indice foliaire du végétal, c'est-à-dire la surface des feuilles rapportée à la surface couverte du sol. En pratique, on considère que la valeur du rapport de captation de la partie aérienne est égale au dixième de la valeur de l'indice foliaire.

La captation relative à l'interception de l'eau de pluie est essentiellement corrélée à la surface foliaire des parties aériennes et à la hauteur d'eau précipitée, sachant que la plante se sature à partir d'une quantité d'eau, dépendant de la nature du végétal et de la nature de l'épiderme des plantes.

La radioactivité des végétaux consommés à la récolte est évaluée à partir du débit moyen de dépôt capté par le végétal, de la rétention du dépôt pendant le temps de croissance, du transfert entre la surface foliaire et les organes consommés et du rendement à la récolte.

Après la récolte, il est possible de calculer l'activité des végétaux à la consommation, en prenant en compte une diminution d'activité selon la décroissance radioactive entre la récolte et la consommation.

Pour évaluer la contamination des végétaux due au transfert sol-plantes (transferts « racinaires » – contamination « indirecte »), l'activité du sol utilisée pour le calcul du transfert sol-plante prend en compte les pertes d'activité du sol par lixiviation et par exportation.

Dans la modélisation, on suppose que les animaux sont dans les champs et qu'ils consomment, de façon continue, de l'herbe ou des fourrages. On détermine l'activité massique des végétaux consommés, puis on évalue le transfert de l'activité des végétaux consommés à la matière organique de l'animal (ses muscles) ou au lait.

L'activité dans les productions animales se calcule à partir de l'activité massique des végétaux consommés par l'animal étudié, de la consommation quotidienne de l'animal et du transfert de la ration quotidienne de l'animal aux produits animaux.

La dose par ingestion comprend la dose due à la consommation de végétaux directement contaminés, la dose due à la consommation de végétaux indirectement contaminés, la dose due à la consommation de produits d'origine animale, provenant d'animaux ayant consommé des végétaux directement contaminés et la dose due à la consommation de produits animaux ayant consommé des végétaux indirectement contaminés ;

- **dose due à la consommation de végétaux**

  Connaissant la quantité consommée de chaque végétal par personne par jour, on en déduit l'activité ingérée par personne par jour. Les coefficients de dose permettent ensuite de passer de l'activité ingérée à la dose ;

- **dose due à la consommation de produits animaux**

  La dose due à la consommation de produits d'origine animale (viande, lait…) est le produit de l'activité dans le produit animal par le coefficient de dose par ingestion. L'activité dans le produit animal se déduit de l'activité dans le végétal consommé, due aux transferts directs ou indirects. Connaissant la quantité consommée de chaque produit, il est possible d'en déduire l'activité ingérée.

8.3.1.4 Cas particulier du ^{14}C

Émis sous forme de gaz (CO_2), le comportement du ^{14}C est traité suivant la méthode du rapport isotopique constant. Dans cette approche, le ^{14}C est supposé se mélanger physiquement et chimiquement avec son isotope stable dans tout compartiment de l'environnement. L'absorption du ^{14}C par les plantes, puis par les animaux, est donc proportionnelle à celle du ^{12}C stable, ce qui entraîne une certaine activité spécifique (Bq ^{14}C/kg ^{12}C).

Pour les végétaux, un facteur de conversion permettant de passer de l'activité intégrée de l'air à l'activité d'un kilogramme de végétal est défini sur base du rapport des concentrations en carbone stable entre les compartiments. Par exemple, le végétal qui prélève le carbone stable de l'air, accumule le ^{14}C en proportion, et atteint la même activité spécifique que le compartiment source, soit l'air.

L'activité dans les produits animaux peut être calculée de la même façon, en évaluant un facteur de conversion dépendant de la teneur en carbone stable dans le produit animal, et dans les aliments ingérés par les animaux.

La dose par ingestion est fonction de la consommation individuelle de végétaux et animaux ($kg.an^{-1}$), et du coefficient de dose par ingestion ($Sv.Bq^{-1}$).

8.3.1.5 Cas particulier du tritium

8.3.1.5.1 Dose par inhalation

La dose par inhalation due au tritium se calcule de la même façon que la dose par inhalation pour les autres radionucléides, par le produit de l'activité intégrée sur le temps par le débit respiratoire et le coefficient de dose par inhalation.

8.3.1.5.2 Dose par passage transcutané

La vapeur d'eau tritiée (HTO) peut être absorbée à travers la peau. En pratique, on définit cette exposition par passage transcutané en considérant que la dose reçue par passage à travers la peau est égale à 50 % de la dose reçue par inhalation.

8.3.1.5.3 Absorption de HTO par le sol et par les plantes

Les différents phénomènes modélisés dans GASCON® concernant le dépôt de HTO sont les suivants :

- **par temps sec** ;
  - ✓ HTO : dépôt sec au sol ; Vd = 3×10^{-3} $m.s^{-1}$;
  - ✓ HTO : échange avec les végétaux fondés sur la différence d'activité volumique entre l'atmosphère et le végétal ;
- **par temps de pluie :**
  - ✓ HTO : dépôt et infiltration de la pluie dans le sol (activité de la pluie d'après le modèle de Chamberlain) ;
  - ✓ HTO : échange direct (par voie aérienne) avec les végétaux, négligé.

8.3.1.5.4 Calcul de l'activité moyenne de l'eau du sol

L'activité moyenne en eau tritiée dans le sol se calcule en rapportant la quantité de tritium déposée au sol (par dépôt sec et dépôt humide) à l'apport total en eau (dépôt sec de vapeur d'eau, eau de pluie, irrigation éventuelle du sol).

8.3.1.5.5 Exposition externe due au dépôt

Pour le tritium, on ne considère pas d'exposition externe au dépôt au sol car, pour cet élément radioactif, le coefficient de dose associé à cette voie est négligeable. Par ailleurs, comme le tritium est mobile, le dépôt restant en surface est très faible.

8.3.1.5.6 Activité des végétaux

L'activité de l'eau tritiée dans les végétaux résulte d'un bilan entre les entrées et les sorties de tritium dans le compartiment foliaire des végétaux. Dans cette relation, on tient compte de l'incorporation de tritium dans le végétal à la fois à travers les feuilles (voie dite « directe », atmosphérique) et par le sol (voie dite « indirecte »). En considérant en première approximation, que la température des feuilles est sensiblement égale à celle de l'air, le rapport C_{eau}/C_{eau}^{sat} représente l'humidité relative. L'activité massique de la vapeur d'eau de l'air en tritium au niveau du sol se calcule à partir de l'activité intégrée de l'air.

L'activité en tritium d'un végétal est contenue non seulement dans son eau, mais aussi dans sa matière organique sèche. Dans une approche simple, on considère que la production de matière est continue quel que soit le type de végétal et dépend essentiellement des facteurs climatiques. L'activité en tritium de la matière produite est en relation avec l'activité de l'eau de la plante. Cependant, il convient de faire une différence entre la part du tritium aisément échangeable et se mettant en équilibre avec l'eau tritiée à laquelle le végétal est exposé, et la part du tritium en position non échangeable et intimement lié à la matière organique. On parle dans ce cas d'OBT ou « *organically bound tritium* ».

Pour évaluer la part du tritium non échangeable, le taux de matière sèche du végétal est pondéré d'un coefficient égal à 0,53. Ce coefficient correspond au produit du facteur de séparation isotopique HTO/H_2O (0,95) par le ratio (90/162), qui correspond au rapport de la masse molaire de $(H_2O)_5$ (M = 90) sur la masse d'une molécule de cellulose ou d'amidon $(C_6H_{10}O_5)$ n (M = 162), ces deux composants ayant le même nombre de moles d'hydrogène.

[25] Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants (79).

8.3.1.5.7 Exposition par ingestion de végétaux

L'exposition par ingestion de végétaux contaminés est obtenue en multipliant l'activité en tritium de l'eau du tissu foliaire par le taux de consommation du végétal par l'individu et par les coefficients de dose par ingestion relatifs aux fractions libre et liée du tritium.

8.3.1.5.8 Activité dans les produits animaux

Pour évaluer l'exposition d'un individu lorsqu'il ingère des produits animaux (lait, viande, œufs…), il faut d'abord calculer l'activité massique des végétaux consommés par les animaux (herbe, foin, maïs, céréales), puis évaluer le transfert d'activité en tritium des végétaux à la matière organique de l'animal (ses muscles), ou au lait, ou aux œufs.

8.3.1.5.9 Exposition par ingestion de produits animaux

L'exposition par ingestion de produits animaux contaminés est estimée en multipliant l'activité massique moyenne du produit animal par le taux de consommation du produit par l'individu et par les coefficients de dose par ingestion relatifs aux fractions libres et liées du tritium dans le produit animal. Pour évaluer la part du tritium OBT, le taux de matière sèche du produit animal est pondéré par un coefficient représentatif, d'une part du fractionnement du tritium par rapport à l'Hydrogène standard lors de son incorporation à la matière organique, et d'autre part du rapport des masses molaires moléculaires de l'eau et des protéines et lipides.

8.3.1.6 Coefficients de dose retenus

» COEFFICIENT DE DOSE

Le coefficient de dose permet de comparer la nocivité des radionucléides, à radioactivité ingérée ou inhalée égale. La dose efficace à laquelle serait exposée une personne qui aurait ingéré une certaine quantité d'une substance radioactive est calculée à partir de la radioactivité des éléments qu'elle contient. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) recommande l'utilisation de valeurs de référence moyennes, décrites dans ses publications qui sont reprises par la directive Euratom[25] puis dans la réglementation française (80).

L'exposition humaine est calculée en utilisant les coefficients de dose issus de la CIPR, repris dans la directive Euratom puis dans l'arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants (37) présentés dans le tableau 8-3 pour les radionucléides susceptibles d'être rejetés par les installations du centre de stockage Cigéo.

Il est rappelé que, dans une démarche enveloppe, les particules émettrices alpha sont assimilées à du ^{239}Pu et les particules émettrices bêta-gamma à du ^{90}Sr. Ces radionucléides sont les plus pénalisants en termes de coefficients de dose à l'homme par inhalation parmi les émetteurs de la même famille.

Tableau 8-3 Coefficients de dose retenus pour les radionucléides considérés dans les évaluations d'exposition humaine

Élément radioactif	Numéro atomique Z	Nombre de masse A	Isotope	Période an	Mode de désintégration	Forme chimique considérée	Vitesse de dépôt sec ($m.s^{-1}$)	Coefficients de dose							
								Irradiation panache ($Sv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{-3}$)	Irradiation dépôt ($Sv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{-2}$)	Inhalation ($Sv.Bq^{-1}$)			Ingestion ($Sv.Bq^{-1}$)		
										Adulte	Enfant de 10 ans	Enfant de 1 à 2 ans	Adulte	Enfant de 10 ans	Enfant de 1 à 2 ans
Tritium	1	3	^{3}H	12,3	Bêta	Eau tritiée, vapeur (HTO)	3×10^{-3}	3.31×10^{-19}	0	$1,80 \times 10^{-11}$	$2,30 \times 10^{-11}$	$4,80 \times 10^{-11}$	$1,80 \times 10^{-11}$	$2,30 \times 10^{-11}$	$4,80 \times 10^{-11}$
Carbone	6	14	^{14}C	5 700	Bêta	Gaz carbonique, $^{14}CO_2$	0	2.24×10^{-19}	$1,61 \times 10^{-20}$	$6,20 \times 10^{-12}$	$8,90 \times 10^{-12}$	$1,90 \times 10^{-11}$	$5,80 \times 10^{-10}$	$8,00 \times 10^{-10}$	$1,60 \times 10^{-9}$
Krypton	36	85	^{85}Kr	10,8	Bêta, gamma	Gaz	0	$1,19 \times 10^{-16}$	0	0	0	0	0	0	0
Strontium	38	90	^{90}Sr	28,8	Bêta	Particule	5×10^{-3}	$7,53 \times 10^{-18}$	$1,11 \times 10^{-08}$	$3,75 \times 10^{-08}$	$5,37 \times 10^{-08}$	$1,19 \times 10^{-07}$	$3,07 \times 10^{-08}$	$6,59 \times 10^{-08}$	$9,30 \times 10^{-08}$
Plutonium	94	239	^{239}Pu	24 110	Alpha	Particule	5×10^{-3}	$4,24 \times 10^{-18}$	$3,67 \times 10^{-19}$	$5,00 \times 10^{-5}$	$4,80 \times 10^{-5}$	$7,70 \times 10^{-5}$	$2,50 \times 10^{-7}$	$2,70 \times 10^{-7}$	$4,20 \times 10^{-7}$

8.3.2 Analyse de sensibilité de l'évaluation aux incertitudes

L'analyse de la sensibilité aux incertitudes est menée sur chaque étape de l'évaluation.

8.3.2.1 Analyse des incertitudes sur les émissions radioactives

L'évaluation des émissions radioactives gazeuses du centre de stockage Cigéo se base sur les activités connues des radionucléides pouvant s'exprimer sous forme gazeuse présente dans les colis de déchets radioactifs MA-VL et sur la fraction de relâchement associée, dont les valeurs sont accompagnées d'incertitudes, sans tenir compte du confinement apporté par les conteneurs de stockage.

La contamination de surface non fixée est basée sur les seuils d'acceptation des colis dans l'installation : 4 $Bq.cm^{-2}$ pour les émetteurs beta/gamma et de 0,4 $Bq.cm^{-2}$ pour les émetteurs alpha. Une fois placée dans leur conteneur de stockage, la remise en suspension de la contamination surfacique des colis primaires est fortement limitée (pas de circulation d'air à l'intérieur du conteneur). Dans l'évaluation, elle est considérée équivalente à un dixième de la contamination surfacique des colis primaires reçus (valeur actuellement non dépassée sur les colis primaires déjà produits et entreposés chez les producteurs).

Les rejets radioactifs des installations sont évalués de manière enveloppe en considérant le bâtiment de surface nucléaire saturé par le type de colis le plus pénalisant en termes d'émissions radioactives et l'ensemble des alvéoles souterrains pleins et ventilés.

8.3.2.2 Analyse des incertitudes sur la dispersion atmosphérique

Les modèles 2D appliqués par le logiciel de dispersion atmosphérique CERES© sont des modèles de type gaussien. Ils mettent en jeu un ensemble d'hypothèses permettant de reproduire de manière simplifiée le phénomène de dispersion. Ces hypothèses sont les suivantes :

- turbulence homogène dans les basses couches ;
- les données d'entrée météorologiques d'une station sont représentatives de l'ensemble du domaine de calcul (aire d'étude) ;
- composante verticale du vent négligeable devant la composante horizontale ;
- régime permanent instantanément atteint.

Tous les modèles gaussiens, peuvent être utilisés pour la modélisation autour de sites situés dans des reliefs peu accidentés et sur lesquels les conditions météorologiques sont homogènes. Le code Gascon utilisé pour évaluer les incidences radiologiques réalise une modélisation du panache en utilisant une méthode à bouffée gaussienne dans une géométrie simplifiée qui ne prend pas en compte le relief existant ni la présence des bâtiments.

Cet outil est également l'outil de référence du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et les modèles physiques mis en œuvre ont déjà été analysés par l'Autorité de sûreté nucléaire et son support technique l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Plusieurs références présentent la qualification de cette plateforme de calcul par l'intermédiaire d'inter-comparaisons avec d'autres logiciels (81, 82).

Des études complémentaires avec des modèles 3D (IMPACT 3D) tenant compte de la présence des bâtiments montrent que les résultats effectués en 2D avec CERES® sont plus pénalisants (44).

Les résultats sont valables pour des distances supérieures à 100 mètres du point de rejet, notamment en cas de présence de bâtiments. Par ailleurs, au-delà de la dizaine de kilomètres, les résultats présentent plus d'incertitudes car d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion doivent être considérés. Les calculs présentés se situent dans le domaine de validité des modèles à savoir dans la fourchette de distance 100 m – 10 km.

La pertinence des modèles gaussiens n'est pas remise en cause, cependant, il est important de signaler que les résultats obtenus par différents logiciels de simulation (ADMS, IMPACT…) représentent environ un ordre de grandeur d'incertitudes dans l'évaluation des activités volumiques des radionucléides et des concentrations massiques des polluants conventionnels. Des comparaisons plus spécifiques du module de dispersion atmosphérique de Gascon et du code de dispersion atmosphérique ARIA Impact™ montrent que les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur et que les écarts ne sont pas de nature à remettre en cause les incidences associées.

Analyse des incertitudes sur les transferts à la biosphère. Les valeurs utilisées pour les facteurs de transfert des radionucléides dans la biosphère, issues du *Technical Report Series* 472 (IAEA 2010 (76)) sont basées sur des modèles déterministes (et non probabilistes) c'est-à-dire qu'ils utilisent des valeurs moyennes et non pas des distributions de valeurs de paramètres. Ces approximations engendrent des incertitudes sur les résultats de calculs sans pouvoir quantifier les fourchettes de valeurs associées.

8.3.2.3 Analyse des incertitudes sur les expositions humaines

Les concentrations à l'intérieur des habitations sont considérées égales aux concentrations extérieures. Cela représente une condition majorante de l'exposition.

Il a été retenu un scénario correspondant à la présence de population 24 heures sur 24 heures, 365 jours par an sur l'aire d'étude. Ce scénario n'est peut-être pas représentatif de la population de l'aire d'étude qui peut être amenée à quitter l'aire d'étude régulièrement pour le travail ou les vacances par exemple. Toutefois cette hypothèse très majorante permet de prendre en compte les cas extrêmes pouvant exister au sein de la population (personnes âgées peu mobiles par exemple, agriculteurs locaux).

La méthode retenue pour réaliser l'enquête alimentaire utilise un échantillon de population dont les familles possèdent un jardin potager ce qui majore l'autarcie moyenne locale.

Par ailleurs, une étude de sensibilité spécifique a été réalisée sur les comportements des populations. En cohérence avec l'approche BIOMASS de l'AIEA (83), l'exposition de catégories particulières de population a été évaluée. Ainsi, cinq groupes particuliers représentatifs de comportements majorants ont été définis : l'éleveur de bovins, le villageois jardinier, le villageois possédant une basse-cour, le chasseur-cueilleur et le travailleur sur le laboratoire de recherche Andra de Meuse/Haute-Marne. Pour ces groupes, le comportement alimentaire est majoré en considérant une consommation et autoconsommation d'une quantité équivalente au 95^{e} percentile de la loi de probabilité disponible. Ces comportements particuliers concernent principalement les adultes. Les calculs ne sont réalisés que pour cette classe d'âge « adulte » et sont comparés à la classe d'âge adulte du groupe dit « multi-activités ». Les résultats montrent que les groupes particuliers villageois jardiniers et éleveur bovin présentent la plus forte dose, deux fois plus importante par rapport au groupe multi-activités.

Les coefficients de dose utilisés pour calculer l'impact des expositions aux rayonnements ionisants proviennent de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Elles sont communément utilisées pour l'évaluation des impacts radiologiques. Ces valeurs résultent de consensus d'experts internationaux dont les incertitudes ne seront pas discutées ici.

Le tritium est considéré sous sa forme vapeur (eau tritiée HTO), compte tenu que cette forme est plus pénalisante par rapport à la forme gazeuse HT (coefficient de dose inhalation de la forme HTO 10 000 fois supérieur au coefficient de dose inhalation de la forme HT).

Pour réaliser une évaluation pénalisante des expositions humaines aux rejets d'aérosols, les particules émettrices alpha ont été assimilées à du ^{239}Pu et les particules émettrices bêta-gamma ont été assimilées à du ^{90}Sr. En effet, les coefficients de dose par inhalation parmi les émetteurs de la même famille, sont plus élevés et sont donc plus impactantes pour la santé humaine.

L'exposition par ingestion de ^{14}C contribue à hauteur de 99 % à la dose efficace engagée calculée. Les valeurs de paramètres de transfert et d'exposition relatifs à cet élément radioactif sont donc particulièrement sensibles dans l'évaluation.

8.3.2.4 Analyse des incertitudes sur le risque sanitaire

Les calculs de dose utilisent des valeurs de coefficients de dose pour chaque voie d'exposition et chaque radionucléide, issus de recommandations internationales.

Pour l'exposition interne (ingestion et inhalation), les valeurs réglementaires de l'arrêté du 16 novembre 2023 (37) sont utilisées, reprenant les valeurs de la commission internationale de radioprotection (CIPR). Pour l'exposition externe, les valeurs du guide de l'agence américaine de l'environnement datant de 1993 sont utilisées car ce sont des références partagées au plan international (34).

Ces valeurs ont été mises à jour en 2019 par l'agence de l'environnement américaine et la commission internationale de radioprotection a également publié des valeurs de coefficients de dose par exposition externe en 2020. Un groupe de travail national étudie les valeurs à retenir comme référence pour les futurs calculs de dose. Les différences observées sont faibles pour les radionucléides considérés dans le cadre du centre de stockage Cigéo. Le résultat des calculs montre que c'est l'exposition par ingestion qui contribue majoritairement (à 99 %) à la dose toute exposition confondue. La dose par exposition externe n'a donc pas d'enjeu sur le calcul de dose en fonctionnement normal.

Les calculs de dose reposent sur des modèles d'exposition et sur des modèles de relation dose-risque. Des scénarios très pénalisants ont été retenus. Les coefficients de dose se basent sur une relation linéaire sans seuil extrapolée pour de très faibles doses. Sur la base d'une relation dose-effet linéaire sans seuil, c'est-à-dire selon le principe que « toute dose même faible représente un détriment sanitaire », la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) adopte une approche prudente et recommande l'application d'une limite annuelle de la dose efficace de 1 $mSv.an^{-1}$. La CIPR juge donc acceptables les conséquences d'une exposition additionnelle continue sur la vie, correspondant à une dose efficace annuelle de l'ordre de 1 $mSv.an^{-1}$, hors exposition médicale et naturelle. Cette valeur limite d'exposition d'une personne du public de 1 $mSv.an^{-1}$ est imposée par l'article R. 1333-11 du code de la santé publique. Parallèlement au principe de limitation des expositions, la CIPR insiste beaucoup sur le concept d'optimisation de la protection radiologique (ALARA), y compris dans le cadre des stockages de déchets radioactifs. L'optimisation consiste à réduire les expositions à des niveaux aussi bas que raisonnablement possible compte tenu des facteurs économiques et sociaux et à intégrer des restrictions sur les doses individuelles. L'Andra considère que l'impact dosimétrique des installations de stockage en fonctionnement normal ne doit représenter, au maximum, qu'une fraction de la limite réglementaire. Pour la conception des centres de stockage, la contrainte de dose retenue est de 0,25 $mSv.an^{-1}$ en phase de fonctionnement.

La relation linéaire sans seuil n'est pas une véritable "estimation" d'un risque, au sens médical du terme, elle est simplement un indicateur réglementaire. La relation linéaire sans seuil rend compte de la relation dose-effet observée dans la cohorte d'Hiroshima et Nagasaki. En réalité, les études publiées montrent qu'aucun cancer radio induit n'a été formellement mis en évidence chez l'adulte en dessous de 100 mSv à débit de dose élevé. La radioprotection en France et au niveau international repose sur une recherche fondamentale et appliquée de haut niveau ainsi que sur une organisation cohérente qui va des instances internationales comme l'UNSCEAR et la CIPR aux responsables nationaux. Au cours des dix dernières années, la connaissance des risques sanitaires dus à l'exposition à de faibles doses de rayonnements s'est fortement renforcée, grâce au suivi épidémiologique de populations exposées dans différents contextes (professionnel, médical ou environnemental). Les cohortes de survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki, de travailleurs de l'industrie nucléaire et de patients nous informent notamment sur les risques de cancers après des expositions aux faibles doses. Grâce à l'amélioration des protocoles et de la reconstitution dosimétrique et au suivi sur parfois plusieurs dizaines d'années de ces populations, les conclusions sont plus robustes et confirment les hypothèses retenues par les instances internationales sur la relation linéaire sans seuil concernant les faibles doses.

Il reste néanmoins de nombreux champs de connaissances à améliorer, comme les effets des contaminations internes et des cocktails d'expositions. Ce sujet suscite de nombreuses interrogations notamment au sein de la communauté de la recherche, les connaissances scientifiques à son sujet sont encore limitées. Il est en particulier très difficile de prédire les effets des « cocktails » auxquels les populations sont exposées. L'Andra suit les avancées de la recherche – voire participe à certains travaux – de façon à prendre en compte, dans les évaluations des risques, les nouvelles connaissances au fur et à mesure de leur validation scientifique.

Les évolutions attendues restent néanmoins faibles. Par exemple, les incertitudes liées aux modèles sur lesquels sont basés les coefficients de dose efficace ont ainsi été développées par Leggett *et al.,* en 2007 (in Grare 2017). Phipps *et al., (84)* qui ont estimé que les coefficients de dose effective (*i.e.* DPUI) seraient pour certains radionucléides de 25 % à 50 % moindres que les valeurs actuellement recommandées (in Grare 2017). Très récemment, en 2016, est sortie la publication n° 134 de la CIPR. Intitulée « *Occupational intakes of radionuclides : part 2* » (85) et faisant directement suite à la CIPR 130 de 2015 (86), elle actualise certaines données dosimétriques concernant certains radionucléides. Cette révision n'est possible que suite à la reprise exhaustive des connaissances et avancés de la Science. En effet, une nouvelle valeur de dose efficace engagée par unité d'incorporation (DPUI) est précisée pour certaines formes chimiques. Ainsi lors de contaminations survenant sur un mode digestif, la DPUI selon la CIPR 134 (85) peut correspondre à une diminution de 16 % soit environ un sixième de la DPUI actuellement retenue par l'arrêté du 16 novembre 2023 (37) pour le Cobalt 60.

8.3.3 Conclusion

L'analyse de la sensibilité de l'évaluation aux incertitudes, restituée dans le tableau 8-4 ci-après, vise à vérifier la fiabilité des évaluations réalisées.

Tableau 8-4 Analyse de sensibilité aux incertitudes sur l'évaluation des incidences liées aux émissions radiologiques sur la santé humaine

Étape	Hypothèse retenue	Commentaire	Incertitude
Définition des émissions	Limitation aux radionucléides potentiels	Bonne connaissance des radionucléides présents dans les déchets basés sur les données de connaissances des producteurs (maîtrise de la production, caractérisation des déchets, retour d'expérience de la surveillance des colis...)	Faible
	Utilisation des limites réglementaires de contamination surfacique, diminuées d'un facteur 10	Le retour d'expérience de la surveillance des colis montre que cette hypothèse est majorante	Faible
Définition des caractéristiques de l'exposition humaine	• population de référence multi-activités ; • temps d'exposition ; • volumes respiratoires (inhalation) ; • consommation locale (ingestion).	• faible différence entre le groupe de référence multi-activités et les groupes particuliers étudiés ; • données caractéristiques de l'homme (adulte, enfant) basées sur des normes internationales (CIPR) ; • enquête réaliste de consommation alimentaire réalisée localement.	Faible
Hypothèses de dispersion atmosphériques et d'exposition humaine	• localisation des populations ; • direction et vitesse du vent ; • relief et obstacles ; • fréquence et intensité des pluies ; • vitesse spécifique de sédimentation ; • type de végétaux ou d'animaux.	Localisations des populations existantes aux endroits les plus exposés aux vecteurs Données locales disponibles	Faible
Modélisation de la dispersion atmosphérique	• code dispersion vapeurs et aérosols ; • code dispersion ^{14}C ; • code dispersion ^{3}H.	Codes basés sur des modèles les plus robustes au niveau international et utilisés dans leurs limites d'utilisation, avec calage des écarts type de dispersion basés sur des expérimentations réelles (Pasquill-Turner) sans possibilité de calage pour cette étude précise (pas de traçage envisageable)	Faible

Étape	Hypothèse retenue	Commentaire	Incertitude
Modélisation des transferts dans l'environnement	• air eau ; • air sol ; • air plante ; • air animal ; • eau sol ; • eau plante ; • eau animale ; • sol plante ; • sol animal ; • plante animal.	Bases de données acceptées au niveau international mais plages de variation parfois importantes Hypothèse de condition d'équilibre considérée entre les milieux Les valeurs pour les facteurs de transfert dans la biosphère, issues du TRS 472 (76), reflètent une approche déterministe (et non probabiliste) ; il s'agit de valeurs moyennes et pas des distributions de valeurs de paramètres. Ces approximations engendrent des incertitudes sur les résultats de calculs sans pouvoir quantifier les fourchettes de valeurs associées.	Moyenne
Calculs d'exposition	• code calcul inhalation ; • code calcul ingestion ; • code calcul contact cutané.	Équations éprouvées	Faible
Évaluation de la dose efficace engagée	• dose efficace par inhalation ; • dose efficace due l'irradiation externe par le panache ; • dose efficace due à l'irradiation externe par les dépôts, les dépôts prenant en compte l'accumulation dans le temps après plusieurs années de fonctionnement ; • dose efficace due à la consommation de productions agricoles, végétales et animales, contaminées par les dépôts. Si nécessaire, dans le cas du tritium la dose due au passage transcutané	Coefficients de dose les plus robustes issus d'expertises internationales Facteurs d'incertitude intégrés	Faible
Analyse du risque sanitaire	Articles R. 221-1 et suivants du code de l'environnement (codifiant le décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 (87) relatif à la surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et sur l'environnement, aux objectifs de qualité de l'air, aux seuils d'alerte et aux valeurs limites)	Facteurs d'incertitude intégrés	Faible

Les incertitudes sont globalement faibles et compensées par des hypothèses majorantes sur les estimations des émissions, des expositions humaines, conférant une bonne fiabilité des résultats de l'évaluation des incidences sur la santé humaine et du risque sanitaire associé.

8.4 Méthodes d'évaluation des incidences après fermeture sur la santé humaine

Les évaluations quantitatives visent à mesurer la performance des composants du stockage, en particulier le rôle central de la couche du Callovo-Oxfordien, vis-à-vis de la limitation de la migration des radionucléides et substances toxiques chimiques contenus dans les déchets une fois relâchées par les colis et les incidences sur la santé humaine.

Les performances des composants du système de stockage pour retarder et limiter le transfert des radionucléides et substances chimiques sont évaluées *via* un ensemble d'indicateurs (dits de performance) appropriés indiqués ci-après.

Les incidences sur la santé humaine sont appréciées *via* l'évaluation quantitative de ces scénarios permet d'apprécier les incidences à long terme du stockage sur l'homme, exprimées en termes de dose.

8.4.1 L'analyse des risques et incertitudes

L'analyse des risques et incertitudes constitue le support pour l'identification et la définition de scénarios à quantifier pour les évaluations de sûreté après fermeture (cf. Figure 8-4).

L'analyse dite des risques et incertitudes consiste en une analyse qualitative de l'ensemble des risques et incertitudes résiduelles portant sur le fonctionnement du stockage lors de la phase long terme après fermeture. Cette analyse se fonde sur l'état des connaissances scientifiques et technologiques disponibles et au regard des fonctions de sûreté que doivent assurer les composants (naturels et ouvragés) du système de stockage après-fermeture et à long terme.

À l'issue de cette analyse du comportement du système de stockage tel qu'il peut être décrit au vu du socle de connaissances scientifiques et technologiques et des incertitudes résiduelles associées, sont identifiés les scénarios de sûreté après fermeture qui seront évalués quantitativement en termes d'une part d'indicateurs de performance en lien avec les fonctions de sûreté et d'autre part d'incidences sur la santé de l'homme.

Cette analyse des risques et incertitudes inclut des itérations entre connaissances scientifiques et technologiques, conception et sûreté qui visent à réduire en tant que de besoin et possible les incertitudes résiduelles ou à y palier, notamment par des dispositions de conception.

La démarche de sûreté après-fermeture s'appuie sur le guide de sûreté n° 1 de l'ASN 2008 (47). Ce guide émet un certain nombre de recommandations pour l'évaluation de la sûreté après fermeture, en particulier de vérifier que les fonctions de sûreté associées au système de stockage sont assurées et que les objectifs de protection sont respectés.

La démarche de sûreté retenue par l'Andra suit les textes relatifs à la sûreté (standards, documents techniques rassemblant des pratiques), émis par les organismes internationaux (AIEA, AEN, CIPR) qui fixent des principes et permettent le dialogue avec la communauté internationale, en établissant des références communes à tous.

L'Andra se réfère également aux textes en vigueur de la CIPR pour les questions relatives à la protection radiologique qui fixe notamment les limites et contraintes en matière de dose.

L'Andra est de plus fortement impliquée dans des coopérations internationales, au travers de collaborations bilatérales ou multilatérales (collaborations entre l'Andra et Nagra par exemple...), de projets européens (cf. Euratom) ou d'instances internationales (*Post closure safety case* (88), workshop scenario (56), projet AEN MeSA (89), projet AIEA BIOMASS (83). Cela permet aux agences de disposer en commun d'une base éprouvée de connaissances, de méthodes et d'analyses ainsi que partager les retours d'expériences.

En complément, l'Andra s'est également attachée à soumettre les résultats des travaux de conception et de sûreté à une évaluation indépendante par un comité faisant intervenir des experts externes (nationaux ou internationaux) ou par des revues de conception à chaque étape clé du développement du projet de centre de stockage Cigéo (esquisse, avant-projet...) faisant également appel à des experts externes (cf. Chapitre 2.5 du volume II de la présente étude d'impact).

8.4.1.1 Panorama des risques

Après fermeture du stockage, les risques sont classés en deux grandes catégories :

- les risques dits « risques internes » qui sont liés à des perturbations d'origine interne. Ils correspondent aux perturbations et leurs éventuelles interactions liées à la présence du stockage (présence de colis radioactifs dégageant des rayonnements et pour certains de la chaleur, présence d'ouvrages souterrains remblayés/scellés). Ainsi les perturbations peuvent être d'origine :
  - ✓ thermique par la présence des colis radioactifs ;
  - ✓ hydraulique par la présence des ouvrages souterrains ;
  - ✓ gaz par la présence de matériaux/composants métalliques du fait de leur corrosion en conditions anoxiques ;
  - ✓ mécanique par la présence d'ouvrages souterrains ;
  - ✓ chimiques, bactériologiques et radiologiques par la présence des composants ouvragés de différentes natures dont les colis de déchets radioactifs, Ces perturbations sont analysées vis-à-vis de leur impact potentiel sur les fonctions de sûreté du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés.
- les risques liés à des aléas et activités d'origine externe dits « risques externes » liés :
  - ✓ aux évolutions des évènements climatiques et géodynamiques : évolution naturelle et effets anthropiques sur le climat et l'environnement, aléa sismique ;
  - ✓ aux intrusions humaines involontaires fondées sur les hypothèses pessimistes suivantes :
    - l'existence du stockage et son emplacement sont oubliés ;
    - le niveau de technologie est le même qu'aujourd'hui.

Ces risques sont analysés pour évaluer leur influence sur les fonctions de sûreté, notamment s'ils peuvent conduire à une perte d'une ou plusieurs de ces fonction(s) de sûreté.

8.4.1.2 Panorama des incertitudes liées à l'état des connaissances sur le long terme

Afin d'estimer le bon fonctionnement du système de stockage et sa robustesse vis-à-vis de l'objectif fondamental de sûreté, l'accent est porté en après fermeture sur l'intégration des connaissances scientifiques et technologiques et la maîtrise des incertitudes résiduelles identifiées.

Les incertitudes résiduelles liées à l'état de la connaissance scientifique et technologique sont classées en quatre grandes catégories :

- les incertitudes résiduelles de connaissance sur des données d'entrée nécessaires pour concevoir les composants ouvragés du système de stockage dites « incertitudes des données d'entrées ». Ce sont :
  - ✓ d'une part, les colis primaires incluant leur inventaire radiologique et leur comportement dans le temps ;
  - ✓ d'autre part, le site d'implantation dont notamment la couche du Callovo-Oxfordien et ses formations encaissantes.
- les incertitudes résiduelles de connaissance sur les caractéristiques intrinsèques des composants ouvragés du système de stockage (conteneur de stockage, scellements…) et leur agencement dans l'installation souterraine dites « incertitudes technologiques » ;
- les incertitudes résiduelles de connaissance portant sur l'évolution physico-chimique du système de stockage (couche du Callovo-Oxfordien et composants ouvragés) dites « incertitudes de comportement sur le long terme » ;
- les incertitudes résiduelles de connaissance sur l'évolution à long terme du milieu géologique environnant (hydrogéologie du site…) et de la biosphère.

8.4.1.3 Méthodologie d'analyse des risques et incertitudes et d'identification des scénarios

Dans son principe, tel qu'illustré en figure 8-4, l'analyse des risques et incertitudes après fermeture consiste :

- pour les composants contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté :
  - ✓ à identifier si les risques et les incertitudes résiduelles de connaissance sont susceptibles d'affecter ou non la réalisation d'une ou plusieurs fonction(s) de sûreté définie(s) pour la phase long terme après-fermeture.
- pour un composant ne contribuant pas à la réalisation d'une fonction de sûreté :
  - ✓ à examiner l'influence des incertitudes résiduelles de connaissances sur le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère.
- en une appréciation qualitative mais argumentée sur les effets potentiels des risques et incertitudes analysés. Elle permet ainsi d'identifier les causes de dysfonctionnement des composants et d'évaluer s'il peut y avoir une diminution significative des performances attendues de ces composants et engendrer la perte d'une fonction de sûreté ;
- à proposer des modalités de gestion de ces risques et incertitudes :
  - ✓ soit dans le cadre de l'approche itérative entre conception, connaissances scientifiques et technologiques, et sûreté. Il s'agit alors, lorsque c'est possible, de retenir des dispositions de conception du stockage qui rendent le système peu sensible à ces risques et/ou incertitudes. À titre illustratif, il s'agit du recours à des matériaux dont le comportement est maîtrisé (acier non allié, béton, bentonite etc.) et à un conteneur de stockage HA étanche durant la période thermique, pour se prémunir notamment des incertitudes sur le comportement des radionucléides et substances toxiques chimiques en température ;
  - ✓ soit par leur prise en compte dans des scénarios appropriés d'étude de l'évolution du système de stockage à travers des choix d'hypothèses enveloppes (composants, modèles de représentation des composants et de leur comportement dans le temps, paramètres des modèles).

Les causes possibles de dysfonctionnement du ou des composant(s) impliqué(s) sont alors identifiées et un jugement qualitatif sur leur vraisemblance et leurs effets est porté en s'appuyant sur la connaissance scientifique et technologique. Cette appréciation conduit à la classification en scénario d'évolution altérée ou en scénario *What-if* :

- si les causes de dysfonctionnement identifiées sont jugées peu vraisemblables, des scénarios d'évolution altérée sont alors définis. Ils visent à évaluer les conséquences de la dérive dans le temps du système de stockage et de vérifier les lignes de défense ;
- si les causes de dysfonctionnement sont jugées très peu vraisemblables, des scénarios de type *What-if* sont postulés et définis pour tester la robustesse du système de stockage.

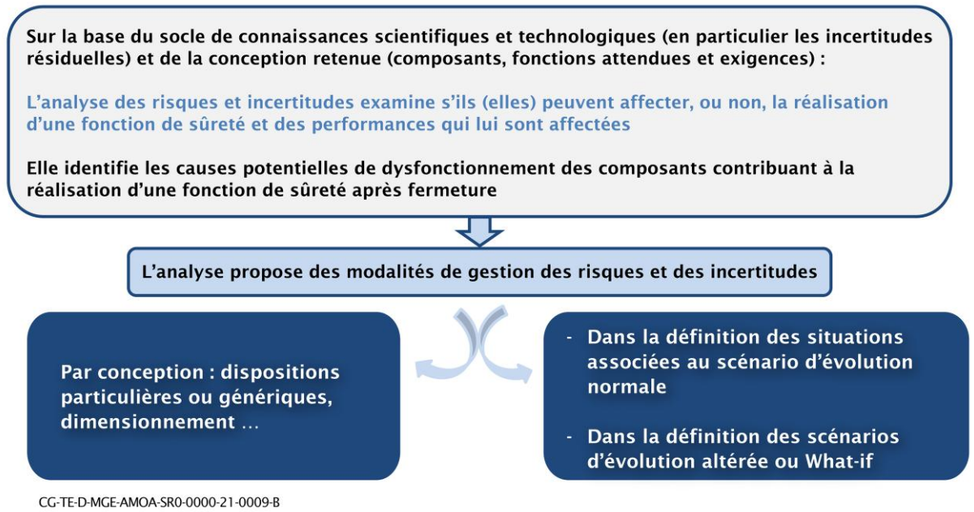


Figure 8-4 *Schéma illustratif du déroulement de l'analyse des risques et incertitudes après fermeture*

Chaque fonction de sûreté est analysée afin d'une part d'identifier des causes potentielles de dysfonctionnement communes aux composants contribuant à sa réalisation, et d'autre part, d'examiner la possibilité de regroupement de scénarios. L'analyse globale conduit ainsi à l'établissement des scénarios pour lesquels les incidences sont évaluées quantitativement (cf. Figure 8-5). En s'appuyant sur l'analyse conduite, les scénarios de sûreté sont définis et des hypothèses qui se veulent prudentes sont retenues, afin de tenir compte des incertitudes résiduelles de toute nature, pour représenter le stockage et son évolution dans le temps.

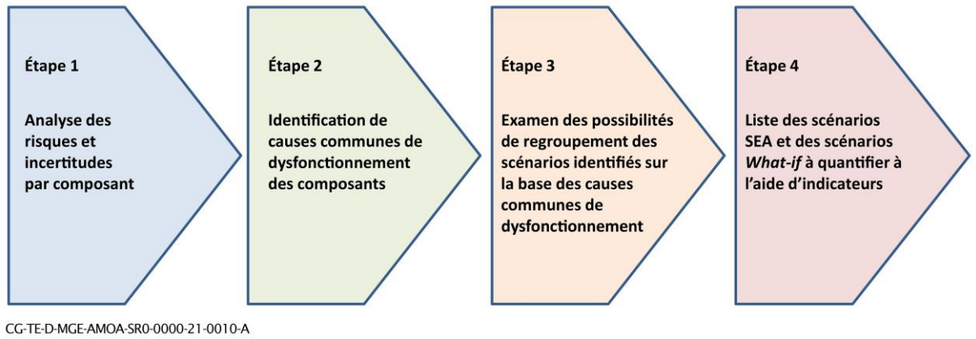


Figure 8-5 *Schéma illustratif de l'établissement de la liste de scénarios à quantifier sur la base de l'analyse des risques et incertitudes*

L'analyse est conduite à chaque itération de sûreté/conception/connaissances scientifiques et technologiques pendant le développement du centre de stockage, s'appuie sur les avancées de la connaissance technologique et scientifique relative à l'après fermeture.

8.4.2 Conceptualisation des scénarios et les outils de l'évaluation quantitative

Sur la base de la description du scénario, une première étape dite de « conceptualisation » est menée pour réaliser les évaluations quantitatives. Cette conceptualisation permet de représenter l'ensemble des échelles d'espaces à considérer, les différents « compartiments » des ouvrages souterrains, de la couche du Callovo-Oxfordien et son environnement.

L'évaluation quantitative se fonde ensuite sur l'utilisation d'outils numériques capables de modéliser et de quantifier le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques par les colis, leur migration dans les ouvrages souterrains, dans la couche du Callovo-Oxfordien puis les formations encaissantes de la couche du Callovo-Oxfordien (Formations du Dogger et de l'Oxfordien carbonaté) et *in fine* jusqu'aux exutoires (cf. Figure 8-6).

Les données de sortie de cette étape dite de « simulation » permettent d'évaluer quantitativement les indicateurs de performance et les concentrations des radionucléides et des substances toxiques chimiques arrivant potentiellement aux exutoires dans le temps.

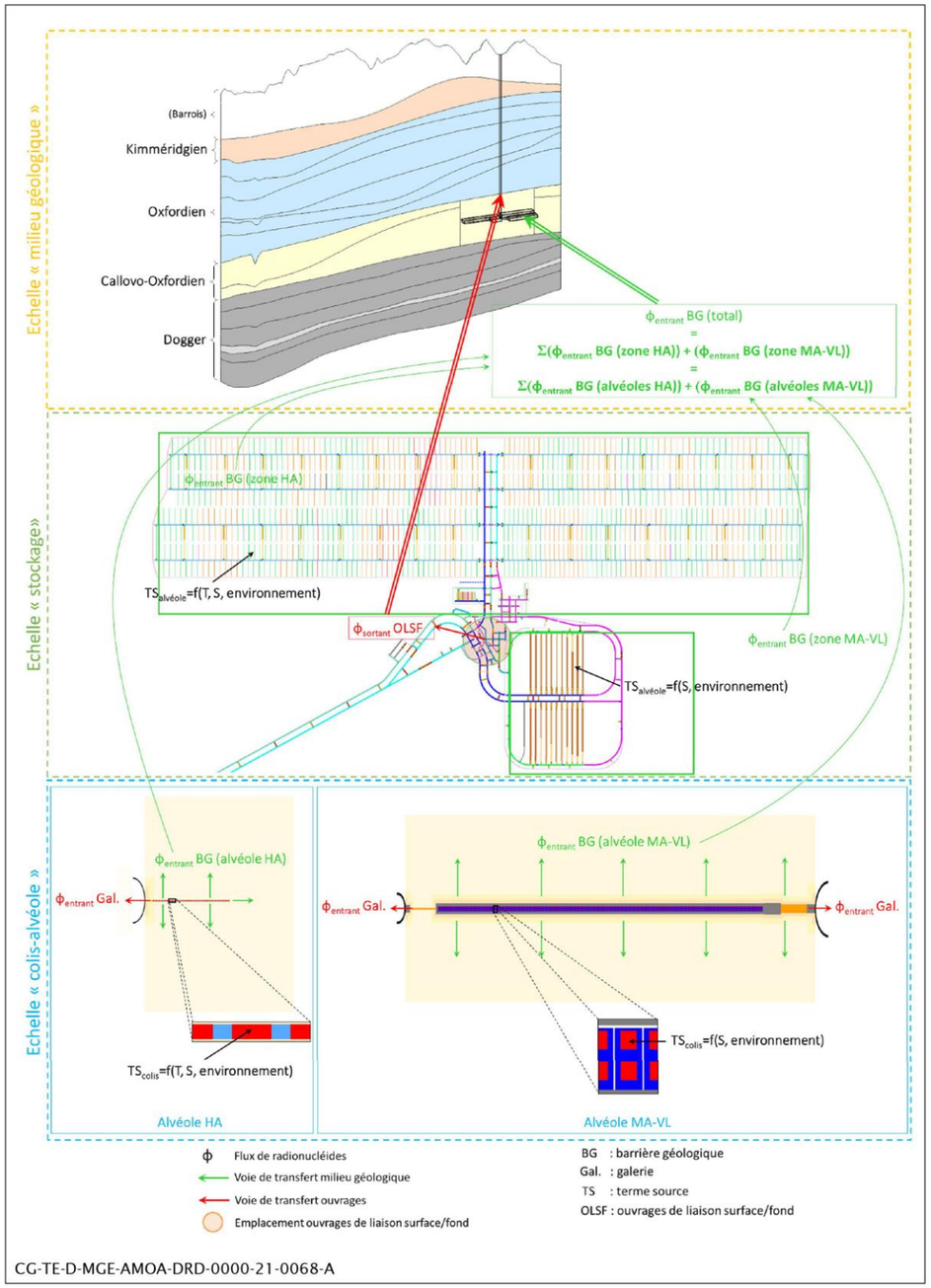


Figure 8-6 *Schéma illustratif de la conceptualisation des scénarios de sûreté après fermeture pour l'évaluation quantitative de sûreté*

Les outils de l'évaluation quantitative des scénarios après fermeture

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

Ces outils font l'objet d'un processus de choix, de qualification et de validation sur le plan des modèles de représentation des processus pris en compte et sur le plan numérique (tests unitaires, benchmarks de cas-tests représentatifs...). Ce processus vise à s'assurer de la pertinence de leur utilisation pour les évaluations quantitatives. Il est ainsi assorti de règles de bonne utilisation des codes de calcul, à travers des études préalables pour identifier le schéma numérique, la discrétisation spatiale (maillage) et temporelle (pas de temps), le solveur, et des benchmarks de codes, permettant *in fine* d'obtenir un résultat robuste, précis et convergé, et qui minimisent l'erreur numérique pour la résolution des équations.

8.4.3 La vérification des performances du système de stockage et de sa robustesse

Des indicateurs appropriés permettent d'appréhender le fonctionnement du système de stockage dans son ensemble et de s'assurer :

- du caractère favorable, pour la sûreté après fermeture, des performances des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvragés, roche hôte) puis dans leur ensemble ;
- de la robustesse du système de stockage en cas de dysfonctionnement d'un ou plusieurs composants contribuant à la réalisation des fonctions de sûreté (composants naturels ou composants ouvragés).

Les indicateurs retenus pour vérifier le caractère favorable des performances des composants et la robustesse du système de stockage sont en lien avec des critères d'appréciation de l'atténuation et du retard offert par chaque composant contribuant à la réalisation de fonctions de sûreté du système de stockage. Il s'agit principalement :

- des flux d'eau circulant dans les ouvrages souterrains ;
- des débits molaires de radionucléides au cours du temps à la sortie de chacun des composants (colis, alvéole, scellements, formation-hôte) ;
- de la cartographie des concentrations en radionucléides et des substances toxiques chimiques en solution dans la couche du Callovo-Oxfordien et/ou dans les formations encaissantes, notamment dans les niveaux aquifères, et de son évolution au cours du temps ;
- des bilans de quantité des radionucléides et des substances toxiques chimiques entre les différents composants du système de stockage dans le temps, notamment à un million d'années.

8.4.4 L'évaluation des incidences sur l'homme

Cette évaluation représente le dernier maillon de la chaîne de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis de déchets jusqu'à l'homme.

L'évaluation de l'incidence sur l'homme liée à la présence de radionucléides vise à vérifier l'atteinte de l'objectif de protection exprimée en termes de dose. Pour cela, l'évaluation de l'incidence sur la santé humaine est réalisée en considérant les différentes voies de transfert jusqu'à l'homme (irrigation, eau de boisson, abreuvement des animaux...) *via* un compartiment dit « biosphère » qui est le dernier maillon pour transformer la concentration, exprimée en Bq/L dans l'eau prélevée à l'exutoire en exposition humaine, dose sur les personnes des groupes hypothétiques considérés, exprimée en $mSv.an^{-1}$ (cf. Figure 8-7).

Les voies d'exposition des personnes considérées sont ainsi :

- une exposition externe liée à l'irradiation induite par les eaux utilisées provenant d'un forage (eaux supposées être contaminées sur le plan radiologique) du fait de leurs activités à l'extérieur de l'habitation ;
- une exposition par l'inhalation de poussières contaminées sur le plan radiologique issues du sol irrigué avec de l'eau provenant d'un forage et remises en suspension pendant le labour ou le jardinage ;
- une exposition par ingestion d'eau de boisson extraite d'un forage et de produits animaux et végétaux issus des activités de la personne (élevage, basse-cour, cultures, jardin...).

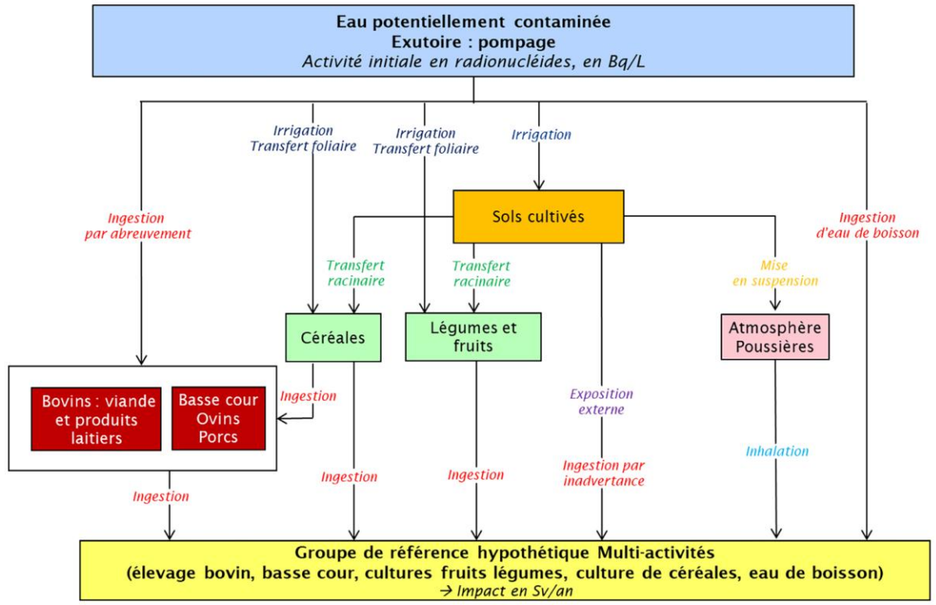


Figure 8-7 *Schéma illustratif des voies de contamination d'un individu utilisant de l'eau potentiellement contaminée par des radionucléides extraite par pompage à un exutoire*

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 (47) et sur les pratiques internationales. Cette démarche mise en œuvre par l'Andra se décline selon les étapes suivantes :

- choix des biosphères types à retenir pour l'évaluation

  Il s'agit de la sélection d'une ou plusieurs biosphère(s) type(s) (tempérées, froides, chaudes) à considérer pour l'évaluation. C'est à cette étape que les choix inhérents à la prise en compte des changements environnementaux (naturels ou anthropiques) sont discutés et justifiés, éventuellement sur la base de modélisations.

  Une fois la liste des biosphères types plausibles définie, l'approche consiste à retenir pour les évaluations les différentes biosphères types possibles sur la durée définie pour les évaluations en regard de leur pertinence vis-à-vis du contexte de l'évaluation et en particulier du scénario de sûreté considéré.

  Les biosphères types retenues pour l'évaluation sont considérées individuellement sans prendre en compte leur enchaînement au cours du temps et sont traitées de manière équiprobable. L'approche conduit ainsi à décrire un modèle conceptuel pour chacune des biosphères types sélectionnées.

  Lorsque le choix des biosphères types à retenir pour l'évaluation est fait, la description phénoménologique de ces biosphères est réalisée. Celle-ci conduit à décrire chaque composante de la biosphère type : climat, végétation, faune, sols, géomorphologie, géologie, hydrologie, hydrogéologie et activités humaines ;
- choix de la localisation des points de prélèvements en eau (exutoires) pour l'alimentation des groupes de référence hypothétiques.

  Cette étape comprend l'identification des exutoires par les études et modélisations hydrogéologiques. La notion d'exutoire renvoie au point de rejet des radionucléides et substances toxiques chimiques dans la biosphère. La démarche conduit à retenir le ou les exutoire(s) et leurs localisations en cohérence avec les modèles hydrogéologiques et de transport des radionucléides et substances toxiques chimiques. Le choix du ou des exutoire(s) alimentant les groupes de référence hypothétiques est alors effectué parmi les exutoires identifiés pour le futur d'après les modélisations hydrogéologiques ;
- choix des groupes de référence hypothétiques à retenir pour les évaluations

  Ce choix s'appuie sur une stratégie dite « *a priori* » qui consiste à considérer plusieurs groupes hypothétiques potentiellement exposés (c'est-à-dire faisant usage de l'eau pompée) avec des comportements représentatifs des habitudes et ressources de la biosphère dans son cadre régional. Il s'agit ensuite de décrire un individu représentatif de chacun des groupes sélectionnés, par sa classe d'âge, ses voies d'exposition et son comportement alimentaire.

  L'approche conduit à examiner d'une part des comportements alimentaires moyens (groupe multi-activités) et des comportements alimentaires particuliers en lien avec une activité particulière (gros mangeur de viande bovine dans le cas d'un individu éleveur de bovins ou gros mangeur de fruits et légumes dans le cas d'un villageois avec un jardin potager par exemple). Cette approche permet de couvrir différentes activités et régimes alimentaires.

  Conformément à l'approche prudente usuelle pour ce type d'études sur de longues échelles de temps, il est fait l'hypothèse que ces groupes consomment en autarcie complète les divers produits animaux et végétaux issus de leurs activités même si ce n'est pas le cas aujourd'hui pour les populations locales ;
- définition des voies d'exposition à l'homme et des voies de transfert potentielles entre l'exutoire et l'homme.

  Les voies d'atteinte à l'homme considérées pour chaque individu représentatif (adulte, enfant de 10 ans ou enfant de 1 an) sont :
  - ✓ l'inhalation (mise en suspension de particules de sols contaminés) ;
  - ✓ l'ingestion (de produits animaux et végétaux, d'eau de boisson, et de sol par inadvertance) ;
  - ✓ l'exposition externe (lors du temps de présence sur des sols potentiellement contaminés et uniquement pour les radionucléides).

À partir d'un point de prélèvement d'eau contenant potentiellement des radionucléides ou des substances toxiques chimiques issues du système de stockage, un modèle est défini afin d'avoir une vue d'ensemble des transferts des solutés de l'exutoire jusqu'à l'homme. Ce modèle de transfert est ensuite paramétré et son évaluation quantitative permet d'obtenir un « facteur de conversion biosphère » qui est utilisé pour évaluer la dose associée à chacun des radionucléides qui parvient aux exutoires sur les personnes représentatives des groupes de référence hypothétiques.

8.5 Méthode d'évaluation des incidences des situations accidentelles sur la santé humaine

8.5.1 Les objectifs de protection pour l'évaluation des impacts sur l'homme

8.5.1.1 Les objectifs de radioprotection

Les objectifs de radioprotection sont fixés en fonction du risque de dissémination des substances radioactives et du risque d'exposition aux rayonnements ionisants.

L'Andra s'appuie sur les recommandations édictées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Le principe d'optimisation sous contrainte de dose, en tenant compte des facteurs économiques et sociaux (ALARA), s'applique à la protection des travailleurs et du public vis-à-vis des rayonnements ionisants pendant l'exploitation. Les notions de dose, utilisées dans le cadre de la protection contre les rayonnements, sont définies dans le code de la santé publique (R. 1333-8 et R. 1333-11).

Les objectifs de protection vis-à-vis des risques radiologiques en situations normales et dégradées, ainsi que ceux retenus pour les situations incidentelles et accidentelles, sont présentés dans le tableau 8-5 ci-après.

Tableau 8-5 Objectifs de protection vis-à-vis des risques radiologiques en exploitation

	Personnel classé en zone délimitée[26]	Public - groupe de référence « habitants »
Situations normales et en mode dégradé	Dose[27] inférieure à 5 mSv/an avec l'objectif d'optimiser à moins de 2 mSv/an pour l'essentiel des postes de travail ALARA	Dose inférieure ou égale à 0,25 mSv/an Absence de rejets non concertés Rejets concertés suivant autorisations de rejets
Dimensionnement		
Situations incidentelles de dimensionnement	Dose inférieure à 10 mSv/incident ALARA	**Court terme (24 h)*** : Dose inférieure ou égale à 0,1 mSv **Moyen terme (1 an)**** : Dose inférieure ou égale à 0,25 mSv
Situations accidentelles de dimensionnement	Dose inférieure à 20 mSv/accident ALARA	**Court terme (24 h)*** : Dose de l'ordre du mSv **Moyen terme (1 an)**** : Dose inférieure à 1 mSv **Long terme (durée de vie entière)** ***** : Dose inférieure à 10 mSv
Extension du dimensionnement		
Situations accidentelles d'extension du dimensionnement	ALARA	**Court terme (24 h)** * : dose inférieure à 10 mSv

** La dose efficace est calculée sur la base des expositions externes (dues au panache et au dépôt) et par inhalation (uniquement due au panache).*

*** La dose efficace est calculée sur la base des expositions (exposition externe et ingestion) uniquement dues aux dépôts, pendant une durée d'exposition de 1 an (déduction faite de la phase court terme).*

**** La dose efficace est calculée sur la base des expositions (exposition externe et ingestion) uniquement dues aux dépôts (déduction faite de la phase moyen terme) pour une durée de vie entière (50 ans pour l'adulte et 70 ans pour les enfants).*

Pour les cas de situations accidentelles qui engendreraient des rejets continus sur une longue durée (1 an), l'Andra retient la valeur de 10 mSv.

En cohérence avec à l'article 3.7.I de l'arrêté du 7 février 2012 (19) disposant « *en cas de rejet de substances radioactives le justifiant, l'estimation inclut les doses équivalentes à la thyroïde* », aucun objectif de protection n'est considéré et aucune estimation de doses équivalentes à la thyroïde n'est réalisée. En effet, pour l'INB Cigéo, les inventaires d'iodes radioactifs contenus dans les colis ne sont pas susceptibles, en situation accidentelle, d'être à l'origine d'émissions significatives d'iode radioactif et, en l'occurrence, conduisent à des doses équivalentes à la thyroïde très inférieures à la valeur seuil de 50 mSv définie par l'article D 1333-84 du code de la santé publique.

Concernant la contamination des denrées agricoles, en situation accidentelle, des calculs d'activités massiques sont réalisés sur les denrées alimentaires consommées par le groupe de référence (situé dans les villages avoisinants). Ces calculs sont réalisés à court terme (durée de 24 heures) : contamination des végétaux et contamination des produits d'origine animale (lait par exemple). Les activités massiques maximales sont alors comparées à celles indiquées dans le *Règlement Euratom 2016/52 fixant les niveaux maximaux admissibles de contamination radioactive pour les denrées alimentaires et les aliments pour animaux après un accident nucléaire ou dans toute autre situation d'urgence radiologique (90).*

Les incidences sur la santé de l'homme s'apprécient en tenant compte de la catégorisation des scénarios, et du caractère chronique ou ponctuel des expositions. Cette appréciation prend également en compte le degré de conservatisme des hypothèses et données de l'évaluation et l'analyse des efforts sur la conception du stockage pour que les expositions individuelles soient aussi faibles que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

En ce qui concerne le gaz radon, l'Andra s'appuie sur les dispositions de l'article R. 1333-28 du code de la santé publique et de la directive 2013/59/Euratom du 5 décembre 2013 (40) qui précisent que pour les lieux publics et les lieux de travail la concentration moyenne annuelle en gaz radon doit être inférieure à 300 Bq.m^{-3}.

8.5.1.2 Les objectifs de protection pour les risques non radiologiques

L'intensité des phénomènes dangereux non radiologiques est définie aux valeurs de référence figurant à l'annexe II de l'arrêté du 29 septembre 2005 (91) :

- seuils des effets irréversibles pour les effets toxiques ;
- seuils des effets thermiques :
  - ✓ seuil des effets létaux significatifs (SELS) correspondant à la zone de dangers très graves pour la vie humaine :8 kW/m² ;
  - ✓ seuil des effets létaux (SEL) correspondant à la zone de dangers graves pour la vie humaine : 5 kW/m² ;
  - ✓ seuil des effets irréversibles (SEI) correspondant à la zone de dangers significatifs pour la vie humaine : 3 kW/m².
- seuils des effets de surpression :
  - ✓ seuil des effets létaux significatifs (SELS) correspondant à la zone de dangers très graves pour la vie humaine : 200 mbar ;
  - ✓ seuil des effets létaux (SEL) correspondant à la zone de dangers graves pour la vie humaine : 140 mbar ;
  - ✓ seuil des effets irréversibles (SEI) correspondant à la zone de dangers significatifs pour la vie humaine : 50 mbar ;
  - ✓ seuil des effets correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme : 20 mbar.

[26] Zones délimitées au titre de l'article R. 4451-24 : l'employeur délimite, par des moyens adaptés, les zones surveillées, contrôlées ou radon qu'il a identifiées et en limite l'accès.

[27] Le terme dose correspond à la dose efficace corps entier

8.5.2 Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine

8.5.2.1 Évaluation de l'impact radiologique

8.5.2.1.1 Localisation des émissions et des groupes exposés

Les conséquences des situations accidentelles sont analysées en prenant en compte des personnes localisées à différents endroits. Il s'agit :

- des personnes situées à l'extérieur et à proximité de la clôture de l'INB ;
- des habitants du village de Bure pour des évènements conduisant à un rejet par l'émissaire de l'installation souterraine au niveau de la zone puits ;
- des habitants des villages de Saudron, Mandres ou Bure pour des évènements conduisant à un rejet *via* la cheminée ou la façade du bâtiment nucléaire[28] de surface localisé sur la zone descenderie.

Ces localisations sont retenues dans les évaluations car les concentrations calculées y sont maximales pour les populations selon l'émissaire de rejets considéré. Il est considéré que la direction du vent, au moment de la survenue de l'évènement et pendant toute la durée du rejet, est orientée vers les localisations précisées ci-après dans la figure 8-8.

Trois classes d'âge sont étudiées dans le cadre des évaluations des conséquences sur l'homme en situation d'accident, à savoir l'adulte, l'enfant de 10 ans et l'enfant de 1 an.

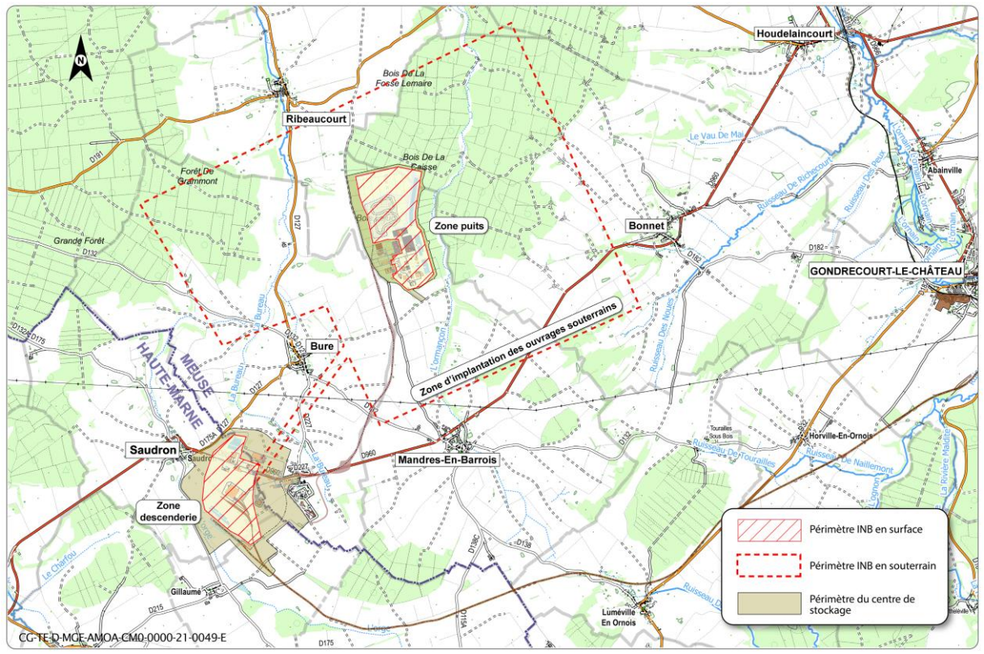


Figure 8-8 *Localisation des villages cibles de Saudron, Mandres et Bure par rapport aux zones descenderie et puits*

Afin d'évaluer les conséquences associées à des rejets de radionucléides, il est retenu différentes voies d'exposition pour l'Homme (cf. Figure 8-9) :

- une exposition liée au rejet se produisant au moment de l'évènement. Cette exposition prend en compte :
  - ✓ l'irradiation/exposition externe par immersion dans le panache (extérieur et intérieur des habitations) ;
  - ✓ l'inhalation durant le passage dans le panache (présence extérieure).
- une exposition liée aux dépôts de radionucléides engendrée par ce rejet :
  - ✓ l'irradiation/exposition externe secondaire due à l'activité des sols à la suite de dépôts atmosphériques en extérieur ;
  - ✓ l'ingestion de produits végétaux pour lesquels l'activité résulte principalement des dépôts d'aérosols et gouttes de pluie (voie directe) mais aussi des transferts racinaires à partir du sol (voie indirecte ou racinaire), et qui conduit à une exposition interne par ingestion ;
  - ✓ l'ingestion de produits provenant d'animaux qui ont consommé des aliments exposés.

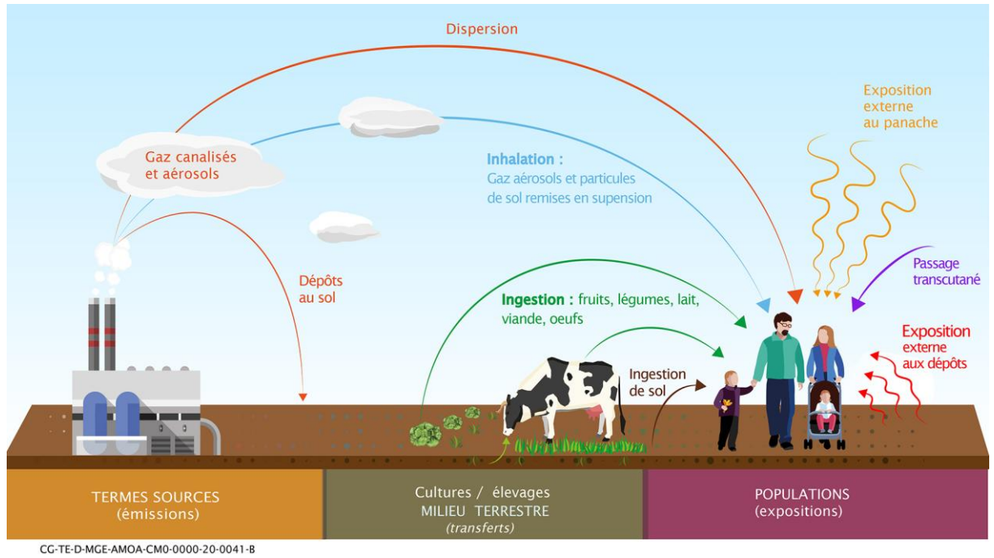


Figure 8-9 *Représentation schématique des voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques*

8.5.2.1.2 Échelles de temps

Pour mémoire et conformément à l'arrêté du 7 février 2012 (41), trois durées d'exposition sont étudiées pour les évaluations de risque sanitaire radiologique aux populations.

Elles sont présentées ci-avant au chapitre 8.5.1.1 du présent volume.

[28] Les évaluations réalisées pour les rejets en façade ne concernent que les habitants de Saudron

8.5.2.1.3 Modélisation

Le logiciel utilisé pour modéliser la dispersion atmosphérique des radionucléides est la plateforme de calcul CERES (Code d'évaluations rapides environnementales et sanitaires) version 6.2.14, basé sur un modèle gaussien, et en particulier le module MITHRA dédié aux situations accidentelles[29].

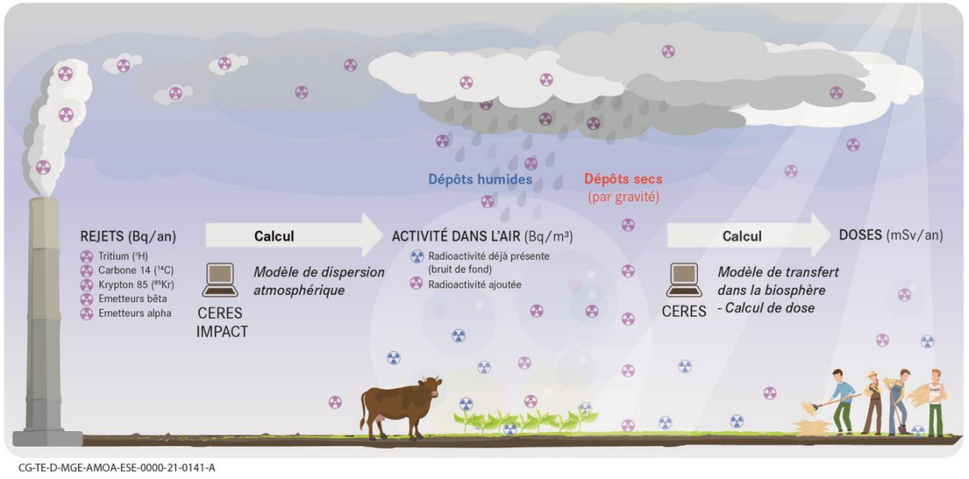


Figure 8-10 Codes de calcul utilisés pour modéliser la dispersion atmosphérique

8.5.2.2 Évaluation de l'impact non radiologique des situations accidentelles

L'impact non radiologique fait référence à l'impact des toxiques chimiques contenus dans les colis de déchets. Les toxiques chimiques étudiés sont les suivants : arsenic, bore, béryllium, cadmium, cyanure libre, chrome, mercure, nickel, plomb, antimoine, sélénium et uranium.

La méthodologie d'évaluation des impacts non radiologiques est similaire à l'évaluation des impacts radiologiques.

Pour les évaluations de l'impact non radiologique, les évaluations sont effectuées à l'aide du code de calcul IMPACT développé par ARIA Technologies, qui modélise uniquement la dispersion atmosphérique (résultats exprimés en concentration dans l'air (mg/m³) et dépôts au sol (mg/m²)).

[29] CERES (43) couple le modèle de dispersion atmosphérique avec le modèle de transferts au travers des chaînes agro-alimentaires vers l'Homme et il permet ainsi de calculer les doses directement à partir des rejets. CERES est également le logiciel de référence du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Il a déjà été analysé par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et son support technique l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

8.5.2.3 Évaluation de l'impact des autres risques induits par le projet global Cigéo

8.5.2.3.1 Transport des colis jusqu'à l'INB Cigéo

L'analyse des risques liés au transport des colis jusqu'à l'INB Cigéo est réalisée sur la base du respect de la réglementation internationale rendue applicable en France notamment par l'arrêté ministériel du 29 mai 2009 dit « TMD » (92) et de :

- la robustesse des emballages. Leur conception permet d'assurer une bonne résistance aux conditions de routine, d'incident et d'accident ;
- la vitesse limitée de circulation des convois de transport ;
- la fiabilité des opérations de transport. Celle-ci vise à réduire l'occurrence des anomalies, des incidents et des accidents ;
- la mise en place d'un dispositif de gestion de crise dans le cas où un incident ou un accident de transport de colis de déchets radioactifs surviendrait.

8.5.2.3.2 Transport, réception et distribution de carburant et risques liés aux chaufferies

L'accident redouté pour le transport, réception et distribution de matières inflammables (carburant et GPL) est une fuite sur le camion de livraison. En présence d'une source d'ignition, cette fuite pourrait être à l'origine d'un incendie (effets thermiques) ou d'une explosion (effets de surpression).

À l'intérieur de la chaufferie, une fuite sur une tuyauterie de GPL ou une défaillance sur le dispositif d'alimentation en GPL d'une chaudière peut conduire à la dispersion de gaz inflammable dans le local. En présence d'une source d'ignition, cette fuite peut être à l'origine d'un incendie ou d'une explosion dans le local.

Les plaquettes de bois sont des combustibles qui, en cas d'incendie, sont susceptibles de s'enflammer et ainsi apporter une masse combustible.

8.5.2.3.3 Substances dangereuses non radioactives en petits contenants, installations/locaux électriques et explosifs éventuellement mis en œuvre pour le terrassement

L'analyse des incidences est réalisée sur la base des bonnes pratiques et du retour d'expérience.

ANNEXES

Annexe 1 Évaluation des risques sanitaires spécifiques aux poussières de verses

Les verses sont majoritairement constituées des argilites du Callovo-Oxfordien issues de l'excavation des galeries souterraines du centre de stockage Cigéo, donc principalement les argilites de l'unité lithostratigraphique dite unité argileuse du Callovo-Oxfordien. Le Callovo-Oxfordien comporte deux principales unités lithostratigraphiques qui se différencient par la teneur en carbonates : dans la partie supérieure, une unité dite silto-carbonatée, plus riche en carbonates, et dans la partie inférieure, l'unité dite argileuse ; cette unité occupe environ les 2/3 du Callovo-Oxfordien et l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo y sont implantées.

Les argilites du Callovo-Oxfordien ont fait l'objet de nombreuses analyses minéralogiques et géochimiques menées depuis plus de 20 ans, et publiées pour beaucoup dans des revues scientifiques de haut niveau (Gaucher *et al.,* 2004 (93) ; Belcourt, 2009 (94) ; Marty *et al.,* 2018 (95)) . Ces analyses indiquent une continuité latérale du Callovo-Oxfordien (*i.e.* Pas de variations minéralogiques significatives en latéral). Comme indiqué dans le chapitre 4 « Sous-sol » du volume III de la présente étude d'impact, les argilites de l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien sont composées en masse à environ 95 % de minéraux primaires : ~40 % de minéraux argileux, muscovite et biotite ; ~30 % de carbonates, principalement de la calcite ; et ~25 % de tectosilicates (quartz et feldspaths). Les autres minéraux présents dans les argilites (environ 5 %) sont principalement des sulfures, dont de la pyrite, et de la matière organique. La pyrite (FeS_2) est présente avec des teneurs en moyenne de 1 % et localement jusqu'à 3 %. Les autres sulfures identifiés sont la sphalérite (sulfure de zinc) et la chalcopyrite (sulfure de fer et de cuivre). La matière organique est présente avec des teneurs comprises entre 0,5 % et 2 %.

Par ailleurs, les analyses montrent aussi que les argilites du Callovo-Oxfordien contiennent relativement peu d'éléments toxiques (tels que des métaux et métalloïdes), en comparaison avec des déblais miniers par exemple, et dans des ordres de grandeur similaires au fond géochimique des sols calcaires rencontrés sur le territoire d'implantation du projet global Cigéo.

Tableau Annexe 1-1 Composition chimique (pourcentage moyen ± écart-type) des argilites du Callovo-Oxfordien (unité argileuse)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	MnO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
44,8 ± 6,5	11,1 ± 2,9	4,1 ± 1,0	2,3 ± 0,3	0,03 ± 0,01	15,0 ± 5,6	0,3 ± 0,1	2,7 ± 0,6	0,6 ± 0,1	0,1 ± 0,1
S	**As***	**Ag**	**B**	**Ba**	**Be***	**Bi***	**Cd***	**Ce**	**Co**
%	**mg/kg**	**mg/kg**	**mg/kg**	**mg/kg**	**mg/kg**	**mg/kg**	**mg/kg**	**mg/kg**	**mg/kg**
0,8 ± 0,3	11 ± 3	<0,2	110 ± 34	196 ± 48	1,9 ± 0,5	0,18 ± 0 08	0,21 ± 0,11	56 ± 13	13 ± 4

Cr	Cu	La	Li	Mo*	Nb*	Ni	Pb*	Sb*	Sc*
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
87 ± 20	15 ± 5	32 ± 4	56 ± 25	0,5 ± 0,2	13 ± 3	40 ± 12	14 ± 4	0,5 ± 0,1	13 ± 1

Se*	Sn*	Sr	U	V	W*	Y*	Zn	Zr
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
0,58 ± 0,03	2,4 ± 0,5	386 ± 196	2,0 ± 0,5	104 ± 30	1,1 ± 0,6	20 ± 3	92 ± 39	156 ± 34

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

Les valeurs toxicologiques de références (VTR) pour les composés minéraux de l'argilite du Callovo-Oxfordien sont présentés dans le tableau annexe 1-2.

Tableau Annexe 1-2 Valeurs toxicologiques de référence associées aux éléments chimiques des verses

Composé Chimique	VTR	Durée d'exposition	Sources	Effet critique/organe cible	Type de VTR
MnO	0,09 µg/m³	Année	OEHHA, 2019	Troubles du comportement neurologique	Effet à seuil
TiO2	0,12 µg/m³	Année	Anses, 2019	Effets sur les cellules alvéolaires	Effet à seuil
As	$1,5 \times 10^{-2}$ µg/m³	Année	OEHHA, 2008	Altération de la fonction intellectuelle	Effet à seuil
	$1,5 \times 10^{-4}$ (µg/m³)$^{-1}$	Année	TCEQ, 2012	Cancer du poumon	Effet sans seuil
Ba	1 µg/m³	Année	RIVM, 2000 (Anses)	Effets cardiovasculaires	Effet à seuil
Be	1×10^{-3} µg/m³	Année	ADSTR, 2023	Bérylliose pulmonaire	Effet à seuil
	$2,4 \times 10^{-3}$ (µg/m³)$^{-1}$	Année	OEHHA, 2011	Cancer du poumon	Effet sans seuil
Cd	0,45 µg/m³	Année	Anses, 2012	Altération rénale	Effet à seuil
	3×10^{-1} (µg/m³)$^{-1}$	Année	Anses, 2012	Cancer du poumon	Effet sans seuil
Mo	$1,2 \times 10^{+1}$ µg/m³	Année	RIVM, 2001	Effet respiratoire	Effet à seuil
Ni	0,23 µg/m³	Année	Anses, 2015	Effets pulmonaires	Effet à seuil
	$1,7 \times 10^{-4}$ (µg/m³)$^{-1}$	Année	Anses, 2015	Cancer du poumon	Effet sans seuil
Pb	0,9 µg/m³	Année	Anses, 2013	Altération rénale, atteinte neurologique	Effet à seuil
	$1,2 \times 10^{-5}$ (µg/m³)$^{-1}$	Année	OEHHA, 2011	Cancer du poumon	Effet sans seuil
U	0,4 µg/m³	Année	ADSTR, 2013	Atteinte pulmonaire	Effet à seuil

Le niveau de risque pour les effets à seuil est estimé par le quotient de danger (QD) qui est considéré comme non préoccupant si sa valeur est inférieure ou égale à 1. Le niveau de risque cancérigène (à effet sans seuil) est estimé par l'ERI, comparé à un risque de 1 pour 100 000 (il doit être inférieur à 10^{-5}) Pour les substances chimiques ne possédant pas de valeur toxicologique de référence (VTR, ERU), les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine sont comparés aux valeurs réglementaires (valeurs limites pour la protection de la santé humaine) ou de référence (objectifs de qualité de l'air) disponibles pour le risque.

Les calculs atmosphériques réalisés pour le projet global Cigéo en phases de construction initiale et de fonctionnement intègrent plusieurs termes sources d'émissions de poussières, dont les verses. Elles montrent que la concentration moyenne la plus forte en poussières pour les populations est obtenue à l'hôtel du Bindeuil et correspond à 6,77 µg/m³ pour les phases de construction initiale et de fonctionnement.

Pour les composés chimiques disposant d'une valeur toxicologique de référence à seuil, les quotients de danger calculés à partir de la concentration maximale de poussières estimée à l'hôtel du Bindeuil, de la composition minérale de l'argilite du Callovo-Oxfordien sont tous inférieurs à 1 (cf. Tableau Annexe 1-3).

Tableau Annexe 1-3 Analyse du risque sanitaire des poussières issues des verses du centre de stockage Cigéo pour les effets à seuil

Composé chimique	Pourcentage dans les argilites du Callovo-Oxfordien (%)	Estimation de l'exposition à l'hôtel du Bindeuil (µg/m³)	QD
MnO	0,03	0,002	$2,26 \times 10^{-2}$
TiO_2	0,6	0,041	$3,39 \times 10^{-1}$
As	0,0011	0,00007	$4,96 \times 10^{-3}$
Ba	0,0196	0,0013	$1,33 \times 10^{-3}$
Be	0,00019	0,0000129	$1,29 \times 10^{-2}$
Cd	0,000021	0,00000142	$4,74 \times 10^{-6}$
Mo	0.00005	0,0000034	$2,82 \times 10^{-7}$
Ni	0.004	0,000271	$1,18 \times 10^{-3}$
Pb	0.0014	0,000095	$1,05 \times 10^{-4}$
U	0.0002	0,0000135	$3,39 \times 10^{-4}$

Les composés minéraux des argilites Callovo-Oxfordien qui disposent d'une valeur toxicologique sans seuil (effets cancérigènes) sont les éléments traces métalliques : arsenic, béryllium, nickel et plomb. Les excès de risque sanitaires estimés à partir de la concentration maximale de poussières et de la composition minérale de l'argilite du Callovo-Oxfordien sont inférieurs à la valeur repère de 10^{-5} (cf. Tableau Annexe 1-4) pour les scénarios 1 et 2 présentés dans l'évaluation des risques sanitaires. Le scénario qui tient compte des classes d'âge est aussi présenté (cf. Chapitre 8.2.3.5 du présent volume).

Les concentrations moyennes les plus fortes en poussières pour les populations sont obtenues à l'hôtel du Bindeuil et correspondent à 10,5 µg/m³ et à 2,1 µg/m³ respectivement pour la phase de construction initiale et de fonctionnement.

Tableau Annexe 1-4 Analyse des risques des poussières issues des verses du centre de stockage Cigéo pour les effets sans seuil

Composé chimique	Pourcentage dans les argilites du Callovo-Oxfordien (%)	ERI (scénario 1)	ERI (scénario 2)
As	0,0011	$4,86 \times 10^{-9}$	$3,14 \times 10^{-9}$
Be	0,0196	$1,34 \times 10^{-8}$	$8,66 \times 10^{-9}$
Ni	0.004	2×10^{-8}	$1,29 \times 10^{-8}$
Pb	0.0014	$4,95 \times 10^{-10}$	$3,19 \times 10^{-10}$

Les quotients de danger (QD) et les excès de risque individuel (ERI) calculés sont tous largement inférieurs aux valeurs repères respectivement de 1 et 10^{-5}. Il faut rappeler que les concentrations de poussières obtenues par le calcul de dispersion atmosphérique n'intègrent pas uniquement les poussières issues des verses mais l'ensemble des termes sources du projet global Cigéo. Les analyses de risques pour les constituants des verses effectuées sur la base de ces concentrations sont donc très majorantes.

À défaut de valeur réglementaire ou de référence en population générale, la concentration en poussières calculée à l'hôtel du Bindeuil est comparée aux valeurs limites professionnelles contraignantes pour les composés chimiques ne disposant pas de valeur toxicologique de référence (cf. Tableau Annexe 1-5). La concentration moyenne modélisée en poussières (6,77 µg/m³) à l'hôtel du Bindeuil est inférieure aux valeurs limites d'expositions professionnelles de la silice cristalline (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3), de l'oxyde de calcium (CaO), et du pentoxyde de phosphore (P_2O_5).

Tableau Annexe 1-5 Valeurs limites professionnelles disponibles pour les composés minéraux ne disposant de VTR

Composé chimique	Pourcentage dans les argilites du Callovo-Oxfordien (%)	Estimation de l'exposition à l'hôtel du Bindeuil (µg/m³)	Valeur limite d'exposition professionnelle (µg/m³)
SIO_2	44,8	3,03	100 (VLEP - 8 h)
Al_2O_3	11,1	0,75	4 000 (VLEP - 8 h)
CaO	15,0	1,02	500 (VLEP - 8 h)
P_2O_5	0,1	0,01	1 000 (VLEP - 8 h)

Les analyses montrent que les constituants minéralogiques des poussières provenant des verses ne constituent pas un danger pour la santé humaine au regard des quantités émises. **L'évaluation des risques chimiques effectuée pour les poussières (PM2,5 et PM10) est donc suffisante pour gérer les risques liés à la dispersion atmosphérique des constituants minéralogiques contenus dans les verses.**

Annexe 2 Données, hypothèses et résultats des calculs dosimétriques réalisés avec le logiciel CERES®

2.1 Filiations des radionucléides prises en compte dans les calculs

Les filiations sont prises en compte par l'intermédiaire des coefficients de dose.

2.2 Facteurs de transfert des radionucléides dans l'environnement

Les facteurs de transfert sol-plante, air-plante ainsi que des facteurs de transfert aux animaux d'élevage, sont issus du *Technical Report Series* n° 472 de l'AIEA (76), et reportées dans le tableau annexe 2-1, le tableau annexe 2-2 et le tableau annexe 2-3.

Tableau Annexe 2-1 Facteur de transfert sol/plante (Bq.kg^{-1} de végétal frais)/(Bq.kg^{-1} de sol sec)

Isotopes	Facteur de transfert sol/plante (Bq.kg^{-1} de végétal frais)/(Bq.kg^{-1} de sol sec)					
	Choux	Carottes	Pommes de terre	Haricots	Tomates	Pommes
^{14}C (CO_2)	1,25 × 10^{-1}	1,25 × 10^{-1}	1,25 × 10^{-1}	1,25 × 10^{-1}	1,25 × 10^{-1}	0 × 10
HTO	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10
OBT	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10
^{231}Pa	4 × 10^{-2}	4 × 10^{-2}	4 × 10^{-2}	2,50 × 10^{-3}	2,50 × 10^{-3}	2,50 × 10^{-3}
^{239}Pu	3,36 × 10^{-5}	6,24 × 10^{-5}	3,15 × 10^{-5}	1,55 × 10^{-5}	3,72 × 10^{-6}	8 × 10^{-6}
^{90}Sr	1,44 × 10^{-1}	9,76 × 10^{-2}	2,73 × 10^{-2}	3,50 × 10^{-1}	8,40 × 10^{-2}	3,90 × 10^{-2}
^{235}U	5,16 × 10^{-3}	4,00 × 10^{-3}	5,88 × 10^{-3}	5,75 × 10^{-3}	1,38 × 10^{-3}	0 × 10

Isotopes	Facteur de transfert sol/plante (Bq.kg^{-1} de végétal frais)/(Bq.kg^{-1} de sol sec)			
	Foin	Herbe	Maïs four,	Blé
^{14}C (CO_2)	1,25 × 10^{-1}	1,25 × 10^{-1}	1,25 × 10^{-1}	1,25 × 10^{-1}
HTO	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10
OBT	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10
^{231}Pa	4 × 10^{-2}	4 × 10^{-2}	4 × 10^{-2}	4 × 10^{-2}
^{239}Pu	1,26 × 10^{-4}	3 × 10^{-5}	1,61 × 10^{-5}	4,21 × 10^{-6}
^{90}Sr	4,74 × 10^{-1}	1,10 × 10^{-1}	2,17 × 10^{-1}	9,46 × 10^{-2}
^{235}U	7,74 × 10^{-3}	7,20 × 10^{-3}	2,42 × 10^{-3}	6,62 × 10^{-3}

Tableau Annexe 2-2 Facteur de transfert air-plante (sans dimension)

Isotopes	Facteur de transfert air/plante (sans dimension)					
	Choux	Carottes	Pommes de terre	Haricots	Tomates	Pommes
^{14}C (CO_2)	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10
HTO	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10
OBT	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10
^{231}Pa	1 × 10	1×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-2}	2×10^{-2}	2×10^{-2}
^{239}Pu	1 × 10	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	3×10^{-6}
^{90}Sr	1 × 10	5×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-2}	2×10^{-2}	$4{,}40 \times 10^{-3}$
^{235}U	1 × 10	1×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-2}	2×10^{-2}	2×10^{-2}

Isotopes	Facteur de transfert air/plante (sans dimension)			
	Foin	Herbe	Maïs four,	Blé
^{14}C (CO_2)	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10
HTO	1 × 10	1 × 10	1 × 10	1 × 10
OBT	0 × 10	0 × 10	0 × 10	0 × 10
^{231}Pa	1 × 10	1 × 10	$2^{E} - 0^{2}$	2×10^{-2}
^{239}Pu	1 × 10	1 × 10	1×10^{2}	1×10^{-2}
^{90}Sr	1 × 10	1 × 10	2×10^{2}	2×10^{-2}
^{235}U	1 × 10	1 × 10	2×10^{-2}	2×10^{-2}

Tableau Annexe 2-3 Facteur de transfert aux produits animaux (j,kg^{-1})

Isotopes	Facteur de transfert aux produits animaux (j,kg-1)					
	Viande (Bovin)	Lait (Vache laitière)	Viande (Mouton)	Viande (Porc)	Œuf (Poule)	Viande (Poule)
^{14}C (CO_2)	$1{,}20 \times 10^{-1}$	5×10^{-2}	1,70 × 10	$5{,}80 \times 10^{-1}$	$2{,}30 \times 10^{-1}$	$2{,}30 \times 10^{1}$
HTO	$2{,}90 \times 10^{-2}$	$1{,}50 \times 10^{-2}$	$4{,}10 \times 10^{-1}$	$1{,}40 \times 10^{-1}$	5,80 × 10	5,80 × 10
OBT	$2{,}90 \times 10^{-2}$	$1{,}50 \times 10^{-2}$	$4{,}10 \times 10^{-1}$	$1{,}40 \times 10^{-1}$	5,80 × 10	5,80 × 10
^{231}Pa	1×10^{-3}	5×10^{-6}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	$4{,}10 \times 10^{3}$	4×10^{-3}
^{239}Pu	$1{,}10 \times 10^{-6}$	1×10^{-5}	$5{,}30 \times 10^{-5}$	8×10^{-5}	$1{,}20 \times 10^{3}$	3×10^{-3}
^{90}Sr	$1{,}30 \times 10^{-3}$	$1{,}30 \times 10^{-3}$	$1{,}50 \times 10^{-3}$	$2{,}50 \times 10^{-3}$	$3{,}50 \times 10^{-1}$	2×10^{-2}
^{235}U	$3{,}90 \times 10^{-4}$	$1{,}80 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$4{,}40 \times 10^{-2}$	1,10 × 10	$7{,}50 \times 10^{-1}$

2.3 Ration alimentaire des animaux

Les rations alimentaires des animaux d'élevage ont été calculées à partir des besoins énergétiques du bétail et des apports des aliments sur la base des recommandations de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). Ces rations sont présentées dans le tableau annexe 2-4.

Tableau Annexe 2-4 Rations alimentaires annuelles des animaux (kg.an^{-1})

	Rations alimentaires annuelles des animaux (kg.an^{-1})				
	Bovin	**Vache laitière**	**Mouton**	**Porc**	**Poule**
Blé	1610	1610	0	803	44
Herbe	9 310	9 310	2 560	0	0
Maïs four,	0	0	0	0	0
Foin	1 530	1 530,00	0	0	0

2.4 Caractéristiques des cultures

Les caractéristiques des cultures sont présentées dans le tableau annexe 2-5.

Tableau Annexe 2-5 Caractéristiques des cultures

Culture	Rendement (kg.m^{-2})	Durée récolte (j)	Date récolte (j)	Début de consommation (j)	Fin de consommation (j)	Rapport de surface (-)	Indice foliaire (-)	Fraction de matière sèche (-)	Surface des cultures (m^2)	Systèmes agricoles
Choux	3,5	42	-	-	-	1	0,5	0,12	100	Jardin
Foin	0,59	42	-	-	-	1	3	0,85	100	Champ
Herbe	1	42	-	-	-	1	3	0,17	100	Pâture
Carottes	3	-	30	30	360	0	2	0,16	100	Jardin
P, de terre	3	-	30	30	360	0	2	0,21	100	Champ
Haricots	0,4	30	-	-	-	0,1	2	0,25	100	Jardin
Maïs four,	2	30	-	-	-	1	3	0,31	100	Champ
Tomates	3	30	-	-	-	0,1	2	0,06	100	Jardin
Pommes	3,7	-	30	30	360	0,05	0,1	0,16	100	Verger
Blé	2	-	30	30	360	0,01	7	0,86	100	Champ

2.5 Caractéristiques des sols

Les caractéristiques des sols sont présentées dans le tableau annexe 2-6.

Tableau Annexe 2-6 Caractéristiques des sols

Profondeur jardin (cm)	Masse volumique jardin (kg.m^{-3})	Pluie efficace jardin (mm.an^{-1})	Fraction argile	Fraction Limon	Fraction Sable	Fraction Matière Organique	Irrigation jardin (mm.an^{-1})
20	1 300	50	0,41	0,45	0,09	0,05	0

2.6 Conditions météorologiques

Les variations des conditions de transfert au cours de l'année, moyennées sur une chronique de cinq années (2015-2019), sont prises en compte par la fréquence d'apparition des conditions météorologiques, mesurées au pas de temps horaire, sur les 18 secteurs de 20° (18 × 20°= 360°) de la rose des vents, couvrant l'ensemble des directions et pour chacune des cinq classes de stabilité de Pasquill étudiées (A, B, C, D, E, F) avec ou sans pluie. Les valeurs distribuées en fonction de la vitesse du vent par secteur sont restituées dans les tableaux suivants. Un tableau par classe de stabilité atmosphérique est défini sachant que la totalité des occurrences météorologiques sont réparties sur l'ensemble des tableaux (répartition en pour mille).

Tableau Annexe 2-7 Conditions de diffusion : À sec

Secteur (°)	Vitesse représentative (m.s^{-1})							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0,0	0,0	0,0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0,0	0,0	0,0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0,0	0,0	0,0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
120	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
140	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
160	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
220	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
240	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
260	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
280	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
320	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tableau Annexe 2-8 Conditions de diffusion : À pluie (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative (m.s^{-1})							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
140	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
160	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
220	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
240	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
260	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
280	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
320	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tableau Annexe 2-9 Conditions de diffusion : B sec (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative ($m.s^{-1}$)							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
60	0.0	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.1	0.5	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0
100	0.1	0.2	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
120	0.1	0.3	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
140	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
160	0.0	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
180	0.0	0.3	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
200	0.0	0.2	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
220	0.0	0.4	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
240	0.0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
260	0.0	0.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
280	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.1	0.4	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0
320	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.0	0.3	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0

Tableau Annexe 2-10 Conditions de diffusion : B pluie (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative ($m.s^{-1}$)							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
140	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
160	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
220	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
240	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
260	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
280	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
320	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tableau Annexe 2-11 Conditions de diffusion : C sec (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative (m.s^{-1})							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.2	1.5	1.7	1.2	0.0	0.0	0.0
60	0.5	1.2	3.0	2.2	1.5	0.0	0.0	0.0
80	0.2	1.2	4.9	4.7	0.7	0.7	0.0	0.0
100	0.7	2.5	4.9	2.5	0.5	0.0	0.0	0.0
120	1.0	3.2	3.5	0.5	0.7	0.0	0.0	0.0
140	0.0	2.0	3.2	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0
160	0.2	3.9	3.2	1.5	0.5	0.0	0.0	0.0
180	0.2	3.2	3.7	2.5	1.5	0.0	0.0	0.0
200	0.2	2.5	6.2	2.2	0.5	0.0	0.0	0.0
220	0.5	4.2	4.9	2.7	1.0	0.2	0.0	0.0
240	0.0	2.7	3.2	2.2	1.0	0.5	0.0	0.0
260	0.2	1.7	4.4	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
280	0.0	1.2	3.2	3.2	2.7	0.2	0.0	0.0
300	0.0	1.0	4.7	3.2	1.7	0.0	0.0	0.0
320	0.2	0.5	1.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.5	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.5	3.1	5.6	3.4	1.4	0.2	0.0	0.0

Tableau Annexe 2-12 Conditions de diffusion : C pluie (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative (m.s^{-1})							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
120	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
140	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
160	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
180	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
220	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0
240	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.1	0.0	0.0
260	0.0	0.0	0.1	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0
280	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
320	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0

Tableau Annexe 2-13 Conditions de diffusion : D sec (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative ($m.s^{-1}$)							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.8	0.1	0.6	1.7	4.3	2.4	0.0	0.0
40	1.0	0.6	2.7	5.2	12.5	8.2	1.0	0.2
60	1.2	0.8	3.7	6.4	16.1	19.5	5.4	0.4
80	1.5	1.1	4.0	4.9	11.4	12.4	3.0	0.2
100	1.4	1.3	3.7	4.0	6.0	1.9	0.1	0.0
120	1.5	1.7	2.4	2.5	2.4	0.5	0.0	0.0
140	1.5	1.8	3.4	2.3	2.2	0.5	0.0	0.0
160	1.4	2.3	5.5	3.7	4.9	2.0	0.1	0.0
180	1.3	3.5	10.3	8.4	12.0	9.3	1.3	0.0
200	1.4	4.0	12.4	10.7	10.7	7.1	2.0	0.3
220	1.0	3.2	10.3	9.6	14.4	12.5	2.7	0.2
240	0.7	2.7	6.7	8.2	18.3	18.8	3.9	0.4
260	0.7	2.2	5.4	5.6	13.1	13.1	4.5	0.5
280	0.5	1.8	5.6	6.7	11.4	5.1	1.3	0.2
300	0.4	2.1	8.1	7.6	10.5	2.4	0.1	0.0
320	0.3	1.0	6.0	7.1	5.6	0.9	0.0	0.0
340	0.3	0.6	3.5	3.4	3.6	0.6	0.0	0.0
Total (%)	1.7	3.1	9.4	9.8	15.9	11.7	2.6	0.2

Tableau Annexe 2-14 Conditions de diffusion : D pluie (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative ($m.s^{-1}$)							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0
20	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0
40	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.0
60	0.0	0.1	0.1	0.2	0.7	0.5	0.0	0.0
80	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	0.3	0.0	0.0
100	0.1	0.1	0.3	0.2	0.4	0.1	0.0	0.0
120	0.1	0.2	0.4	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0
140	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.0	0.0
160	0.1	0.1	0.6	0.5	0.7	0.4	0.0	0.0
180	0.2	0.3	0.7	1.1	2.3	2.4	0.4	0.0
200	0.1	0.3	1.3	1.4	2.5	3.3	0.8	0.2
220	0.2	0.6	1.3	1.5	3.1	3.7	2.0	0.4
240	0.1	0.3	1.2	1.7	3.9	7.2	3.3	0.6
260	0.0	0.2	0.8	1.1	2.5	5.4	3.6	1.0
280	0.0	0.1	0.9	1.3	2.2	2.1	1.0	0.1
300	0.0	0.1	0.8	1.3	2.4	1.2	0.1	0.0
320	0.0	0.1	0.5	1.1	1.5	0.7	0.1	0.0
340	0.0	0.0	0.3	0.2	0.7	0.2	0.0	0.0
Total (%)	0.1	0.3	1.0	1.3	2.5	2.8	1.1	0.2

Tableau Annexe 2-15 Conditions de diffusion : E (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative (m.s^{-1})							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.0	0.0	0.7	0.9	0.3	0.0	0.0	0.0
20	0.2	0.1	0.4	0.8	2.5	0.3	0.0	0.0
40	0.2	0.2	1.2	2.7	7.8	1.2	0.0	0.0
60	0.3	0.4	1.6	3.6	10.2	1.5	0.0	0.0
80	0.4	0.4	1.8	3.1	8.0	1.3	0.0	0.0
100	0.4	0.8	2.2	2.3	2.4	0.2	0.0	0.0
120	0.2	0.6	1.8	1.3	0.7	0.0	0.0	0.0
140	0.3	1.0	2.1	1.6	0.6	0.0	0.0	0.0
160	0.4	1.3	3.6	1.9	1.4	0.2	0.0	0.0
180	0.4	2.3	7.0	4.0	4.0	0.5	0.0	0.0
200	0.4	2.3	7.0	5.0	2.4	0.3	0.0	0.0
220	0.2	1.5	3.6	2.9	2.5	0.1	0.0	0.0
240	0.1	1.0	1.7	2.1	2.5	0.3	0.0	0.0
260	0.1	1.0	1.6	1.2	1.4	0.2	0.0	0.0
280	0.0	0.7	1.9	1.1	0.7	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.7	2.4	1.9	1.0	0.1	0.0	0.0
320	0.0	0.5	3.2	2.3	1.0	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.3	2.0	1.9	0.6	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.4	1.5	4.5	4.1	5.0	0.6	0.0	0.0

Tableau Annexe 2-16 Conditions de diffusion : F (répartition en pour mille)

Secteur (°)	Vitesse représentative (m.s^{-1})							
	0.5	1	2	3	4	7	10	12
0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.2	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2
40	0.3	0.1	0.3	0.8	0.5	0.0	0.0	0.3
60	0.5	0.2	0.7	1.3	0.8	0.0	0.0	0.5
80	0.4	0.1	0.7	1.5	1.2	0.0	0.0	0.4
100	0.4	0.4	0.9	1.2	0.8	0.0	0.0	0.4
120	0.3	0.4	0.8	0.6	0.1	0.0	0.0	0.3
140	0.5	0.5	0.4	0.5	0.1	0.0	0.0	0.5
160	0.5	0.3	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5
180	0.3	0.6	1.5	1.1	0.2	0.0	0.0	0.3
200	0.4	0.5	1.2	0.6	0.3	0.0	0.0	0.4
220	0.2	0.4	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2
240	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2
260	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
280	0.1	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
300	0.1	0.2	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1
320	0.0	0.3	0.8	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0
340	0.0	0.1	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Total (%)	0.5	0.5	1.0	1.0	0.4	0.0	0.0	0.5

D'autres paramètres météorologiques moyens annuels sont nécessaires aux calculs CERES. Ils sont reportés dans le Tableau Annexe 2-17.

Tableau Annexe 2-17 Autres données météorologiques

Paramètre	Unité	Valeur
Hauteur de pluie annuelle	$mm.an^{-1}$	791
Nombre de jours de pluie	$j.an^{-1}$	181
Température de l'air	°C	10,3
Humidité relative de l'air	%	80

TABLEAU DE TRAÇABILITÉ DES PRINCIPALES ÉVOLUTIONS DE L'ÉTUDE D'IMPACT

Le tableau suivant présente une synthèse des principales évolutions de l'étude d'impact, avec selon les colonnes :

- précisions sur les caractéristiques techniques : les précisions que les maîtres d'ouvrage apportent aux caractéristiques détaillées des opérations composant le projet global liées à des précisions ou aux évolutions de la conception notamment en lien avec les procédures de participation du public ;
- évolution de l'état initial : l'évolution de l'état initial de l'environnement en lien avec la date de dépôt de l'étude d'impact ;
- évolution réglementaire : les évolutions réglementaires ;
- précision demandée lors de l'instruction du dossier : précisions que les maîtres d'ouvrage apportent aux caractéristiques détaillées des opérations composant le projet global liées aux réponses apportées aux remarques émises par les services instructeurs lors de l'instruction de la précédente étude d'impact.

La colonne « Actualisation concernée » précise si les évolutions apportées sont liées à la première actualisation de l'étude d'impact (EI-DAC) dans le cadre de la demande de création de l'INB Cigéo et/ou sont liées à la deuxième actualisation de l'étude d'impact (EI-DR0) dans le cadre des premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale.

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
	Général			x		EI-DAC1/EI-DR0	Actualisation réglementaire avec le décret n° 2021-837 du 29 juin 2021 portant diverses réformes en matière d'évaluation environnementale et de participation du public dans le domaine de l'environnement (remplacement du terme « état actuel » par "état initial") (96) Mise en cohérence de l'ensemble des mesures mères et filles de chaque chapitre
	Préambule	x				EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2/EI-DAC3	Actualisation du tableau des volumes de l'étude d'impact Précisions apportées dans la présentation du volume et dans la rédaction du bloc « Étude d'impact et projet global Cigéo »
1	**Populations les plus proches du projet global Cigéo**		x			EI-DR0	Précisions apportées sur les petits villages à l'échelle de l'aire d'étude immédiate et pour les fermes citées et restructuration du chapitre pour meilleure lisibilité avec ajout de cartographies
1.2.1	**Sécurisation de la ligne 400 kV Houdreville - Méry**	x				EI-DAC2	Adaptation du titre du chapitre pour être en cohérence avec le texte du paragraphe
1.2.4	**Déviation de la route départementale D60/960**	x				EI-DAC2	Précision sur le tracé de la route départementale D60/960 retenu
2.1	**Évaluation des incidences liées aux émissions sonores sur la santé humaine**		x			EI-DAC1	Ajout d'une synthèse présentant l'ambiance sonore actuelle de l'aire d'étude immédiate
2.1.1.2	**Définitions**	x		x		EI-DAC1	Précisions apportées aux définitions des notions d'acoustique Actualisation des chapitres relatifs : • à la réglementation française ; • aux recommandations de l'OMS.
2.1.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux émissions sonores, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 13.1 du volume IV de la présente étude d'impact

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
							Ajout de précisions relatives au suivi des émissions sonores.
2.1.3	**Incidences résiduelles**	x				EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Précisions apportées sur les émissions sonores de la ligne ferroviaire 027000 Correction du nombre de passages de train par jour considéré pour les calculs acoustiques en phase de construction initiale Actualisation des résultats avec les nouvelles modélisations acoustiques à toutes les phases du projet global Cigéo et analyse de ces résultats au regard de la santé humaine, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 13.1 du volume IV de la présente étude d'impact Précisions apportées sur le suivi des émissions sonores Mise à jour au regard des niveaux acoustiques issus des deux dernières campagnes de mesures acoustiques réalisées en hiver 2024-205 et été 2025
2.2.1	**Incidences potentielles**	x				EI-DAC1	Précisions apportées sur les effets des vibrations sur la santé humaine Ajout d'une référence à la norme NF ISO 2631-2 de 2014 relative au seuil de perception des vibrations (8)
2.2.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux émissions vibratoires, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 13.2 du volume IV de la présente étude d'impact
2.2.3	**Incidences résiduelles**	x				EI-DR0	Ajout de précisions relatives au suivi des émissions vibratoires des installations du centre de stockage Cigéo
2.3.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux émissions lumineuses, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 13.3 du volume IV de la présente étude d'impact
2.4.1	**Incidences potentielles**	x				EI-DAC1	Reformation du chapitre pour meilleure compréhension
2.4.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux émissions olfactives, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 13.4 du volume IV de la présente étude d'impact
2.5.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux champs électromagnétiques, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 13.5 du volume IV de la présente étude d'impact
3.	**Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine**	x				EI-DAC1	Précisions apportées sur la réalisation d'une étude complémentaire air et santé de type III qui sera intégrée dans une version ultérieure de l'étude d'impact du projet global Cigéo associée aux autorisations nécessaires à la réalisation des infrastructures routières du projet global Cigéo (liaison intersites et déviation de la route départementale D60/960) Actualisation de la présentation de la démarche d'évaluation du risque sanitaire selon le guide Ineris 2021 (20)
3.1	**Évaluation des incidences liées aux effluents chimiques liquides sur la santé humaine**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Précisions apportées concernant les sources d'émissions chimiques liquides Précisions apportées sur les usages des cours d'eau et plans d'eau Ajout d'une synthèse présentant les usages des eaux superficielles et souterraines dans l'aire d'étude éloignée

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
3.1.1.1	**Généralités**	x				EI-DAC2	Précisions apportées sur les caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques et agents infectieux potentiellement présents dans les effluents du projet global Cigéo
3.1.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux effluents chimiques liquides, en lien avec les actualisations apportées aux chapitres 5.3 et 5.4 du volume IV de la présente étude d'impact
3.1.3	**Incidences résiduelles**	x			x	EI-DAC1/EI-DAC2	Précisions et justifications apportées sur les incidences résiduelles des effluents du projet global Cigéo sur la santé humaine Intégration des demandes issues de l'instruction ainsi que des dernières valeurs réglementaires et scientifiques permettant la détermination des valeurs de rejet du centre de stockage Cigéo et des dernières valeurs de protection vis-à-vis de la santé humaine
3.2.1.1	**Généralités**	x				EI-DR0	Dans le tableau présentant les caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques contenus dans les émissions atmosphériques du projet global Cigéo, le trafic et les chaudières biomasse ont été ajoutés comme source de HAP
3.2.1.3	**Les émissions chimiques atmosphériques en phase de construction initiale et de fonctionnement**	x				EI-DAC2	Compléments concernant les sources dites « surfaciques »
3.2.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux émissions chimiques, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 2.4.1 du volume IV de la présente étude d'impact
3.2.3.1.1	**Sources d'émissions chimiques atmosphériques**	x			x	EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Actualisation des sources d'émissions chimiques à toutes les phases du projet global Cigéo et justification des sources non retenues Ajout d'un chapitre concernant la dispersion atmosphérique des constituants minéralogiques Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques. Elles prennent compte : • la mise à jour des données météorologiques (2020-2024) et des flux d'émission (parc de véhicules et engins) ; • la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée 4 mg/m³ pour les poussières inhalables du décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 (71) ; • les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0.
3.2.3.1.2	**Bilan des flux d'émissions**	x			x	EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Actualisation des tableaux présentant les flux d'émissions chimiques des phases de construction initiale et de fonctionnement en lien avec les études APD (reprise des modélisations et des calculs de risques sanitaires) Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques. Elles prennent compte : • -la mise à jour des données météorologiques (2020-2024) et des flux d'émission (parc de véhicules et engins) ; • -la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée 4 mg/m³ pour les poussières inhalables du décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 ;

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
							• -les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0.
3.2.3.1.3	**Voies d'exposition considérées et populations exposées**	x			x	EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Précisions apportées aux voies d'exposition humaine aux émissions chimiques atmosphériques et à la caractérisation des populations exposées Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques. Elles prennent compte : • -la mise à jour des données météorologiques (2020-2024) et des flux d'émission (parc de véhicules et engins) ; • -la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée 4 mg/m³ pour les poussières inhalables du décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 ; • -les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0.
3.2.3.2	**Identification des dangers et des relations dose-réponse**	x			x	EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Précisions apportées sur les choix des traceurs de risque (notamment dioxines et furannes non retenues pour la suite des évaluations) et l'identification des dangers selon les substances retenues Ajout de la VTR PM2.5 et suppression de la valeur de gestion des PM2.5 Ajout de la VTR du CO (objectif de qualité OMS 2021 considéré comme VTR) Suppression des valeurs de gestion réglementaire (hors OMS). Utilisation des nouvelles valeurs OMS 2021 préconisées par l'Ineris 2021 Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques. Elles prennent compte : • -la mise à jour des données météorologiques (2020-2024) et des flux d'émission (parc de véhicules et engins) ; • -la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée 4 mg/m³ pour les poussières inhalables du Décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 ; • -les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0.
3.2.3.3	**Analyse des expositions chimiques atmosphériques**	x			x	EI-DAC1/EI-DAC2	Actualisation des estimations des concentrations dans l'air des phases de construction initiale et de fonctionnement Précisions apportées sur les deux scénarios d'exposition retenus Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques. Elles prennent compte : • -la mise à jour des données météorologiques (2020-2024) et des flux d'émission (parc de véhicules et engins) ; • -la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée 4 mg/m³ pour les poussières inhalables du décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 ; • -les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0.

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
3.2.3.4.1	**Calcul d'indicateurs de risque**	x			x	EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Actualisation des tableaux d'analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour : • les traceurs de risque disposant d'une VTR avec seuil (CO et benzène) ; • le benzène et le PM2.5 concernés par les effets sans seuil. Mise à jour des tableaux d'analyse du risque sanitaire Correction des valeurs du tableau 3-13 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour les traceurs de risque (benzène) disposant d'une VTR avec seuil (erreur dans l'EI-DAC1) Ajout du tableau 3-15 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour les PM2,5 concernées par les effets sans seuil et conclusions associées Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques. Elles prennent compte : • -la mise à jour des données météorologiques (2020-2024) et des flux d'émission (parc de véhicules et engins) ; • -la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée 4 mg/m³ pour les poussières inhalables du décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 ; • -les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0.
3.2.3.4.2	**Caractérisation quantitative globale du risque**	x			x	EI-DAC1/EI-DR0/EI-DAC2	Précisions et justifications apportées sur les effets additifs : • à seuil ; • cancérigènes. Ajout du tableau 3-16 Analyse du risque global pour les effets additifs sans seuil (sans unité) et conclusions associées Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques. Elles prennent compte : • -la mise à jour des données météorologiques (2020-2024) et des flux d'émission (parc de véhicules et engins) ; • -la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) fixée 4 mg/m³ pour les poussières inhalables du décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 ; • -les remarques de l'Autorité environnementale dans le cadre de l'instruction de l'étude d'impact du DR0.
4.1.1	**Généralités**	x				EI-DAC1	Précisions apportées sur les unités utilisées dans le domaine du nucléaire
4.1.2	**Méthode de calcul de l'exposition aux rayonnements ionisants**		x			EI-DAC1	Ajout d'un encart de définition sur le bruit de fond radiologique
4.1.3	**Incidences potentielles du projet global Cigéo**	x				EI-DAC1	Précisions et justifications apportées sur les émissions liées : • au transport des colis de déchets ; • aux activités au sein des installations du centre de stockage Cigéo y compris les effluents liquides non conventionnels.
4.2	**Mesures d'évitement et de réduction**	x				EI-DAC1/EI-DR0	Mise en cohérence des mesures d'évitement et de réduction relatives aux émissions radioactives, en lien avec les actualisations apportées aux chapitres 2.4.2 et 10 du volume IV de la présente étude d'impact

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
4.3.2	Émissions radioactives liquides	x				EI-DAC1	Actualisation des estimations des volumes et de l'activité maximale des effluents liquides non conventionnels produits lors de la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo
4.3.3	Émissions radioactives atmosphériques	x				EI-DAC1	Précisions apportées sur les rejets radioactifs atmosphériques issus de : • l'installation nucléaire de surface ; • l'installation souterraine. Réévaluation des émissions de la phase fonctionnement suite aux études d'APD réévaluées Précisions apportées sur la localisation des concentrations dans l'air des rejets radioactifs Précisions apportées aux voies d'exposition humaine aux émissions radioactives et à l'outil de calcul CERES Ajout d'un tableau présentant les rations alimentaires par classe d'âge
5.	Évaluation des incidences après fermeture sur la santé humaine	x			x	EI-DAC1	Création d'un chapitre spécifique en cohérence avec la « Pièce EPU7 - Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » du présent dossier (48), en lien avec les chapitres 11 et 18 du volume IV de la présente étude d'impact.
5.3.5.1	Les résultats de la situation enveloppe du scénario d'évolution normale				x	EI-DAC2	Mise en cohérence avec mise à jour EMR
6.	Évaluation des incidences des situations accidentelles sur la santé humaine	x			x	EI-DAC1	Création d'un chapitre spécifique en cohérence avec la « Pièce EPU7 - Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » du présent dossier, en lien avec les chapitres 11 et 18 du volume IV de la présente étude d'impact.
6.1.2.3.3	Impacts radiologiques de la situation accidentelle sur le public				x	EI-DAC2	Mise en cohérence avec mise à jour EMR
6.1.2.7	Gestion des situations accidentelles graves		x			EI-DR0	Création d'un chapitre spécifique à la gestion des situations accidentelles graves avec renvoi vers le chapitre 19 du volume IV de l'étude d'impact
7.1	Émissions physiques	x			x	EI-DAC1/EI-DR0/EI_DAC2	Mise en cohérence de la synthèse des incidences des émissions physiques du projet global Cigéo sur la santé humaine, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 2 du présent volume Suppression des renvois au volume IV et ajout de précisions afin de rendre le chapitre autoportant Actualisation des noms des mesures pour mise en cohérence avec le volume IV Justifications développées quant au niveau d'incidence résiduelle
7.2	Émissions chimiques	x			x	EI-DAC1/EI-DAC2	Mise en cohérence de la synthèse des incidences des émissions chimiques du projet global Cigéo sur la santé humaine, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 3 du présent volume Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques et ajout des incidences des émissions chimiques liquides
7.2.2	Les émissions chimiques atmosphériques	x				EI-DR0	Suppression du renvoi au volume IV et ajout de précisions afin de rendre le chapitre autoportant

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
7.3	Émissions radioactives	x				EI-DAC1	Mise en cohérence de la synthèse des incidences des émissions radioactives du projet global Cigéo sur la santé humaine, en lien avec les actualisations apportées au chapitre 4 du présent volume (reprise des modélisations et des calculs de risques sanitaires suite aux études APD)
7.3.3	Les émissions radioactives atmosphériques	x				EI-DR0	Suppression du renvoi au volume IV et ajout de précisions afin de rendre le chapitre autoportant
7.4	Après fermeture	x			x	EI-DAC1/EI-DAC2	Création d'un chapitre spécifique en cohérence avec l'étude de maitrise des risques, pièce 8 du dossier de demande d'autorisation de création (DAC). Cohérence EMR
7.5	Situations accidentelles	x			x	EI-DAC1	Création d'un chapitre spécifique en cohérence avec la « Pièce EPU7 - Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » du présent dossier, en lien avec les chapitres 11 et 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact.
7.7	Conclusion	x				EI-DAC1	Ajout d'une conclusion générale sur les incidences du projet global Cigéo sur la santé humaine
8	Méthodes	x				EI-DAC1	Ajout d'un chapitre présentant l'Observatoire de la santé des riverains autour du centre de stockage Cigéo - OSaRiB
8.1.2	Seuils de nuisances et de recommandations pour le bruit	x			x	EI-DR0/EI-DAC2	Précisions apportées concernant la réglementation acoustique applicable au projet global Cigéo Précisons sur les recommandations OMS
8.2	Méthode d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions chimiques	x		X	x	EI-DAC2	Actualisation qui intègre les résultats des nouvelles modélisations atmosphériques et ajout des incidences des émissions chimiques liquides
8.2.2	Méthode d'analyse des risques sanitaires pour une exposition par inhalation	x				EI-DAC1/EI-DR0	Précisions apportées sur les valeurs toxicologiques de référence prises en compte pour les calculs des risques sanitaires et les recommandations de l'ANSES
8.2.3.1	L'analyse des incertitudes sur les émissions chimiques	x				EI-DAC1/EI-DR0	Précisions et justifications apportées sur les hypothèses prises pour réaliser l'évaluation des risques sanitaires des émissions chimiques atmosphériques
8.2.3.4	L'analyse des incertitudes sur le risque sanitaire		x			EI-DR0	Précisions apportées sur les incertitudes en lien avec les PM2,5
8.2.4	Conclusion	x				EI-DAC1	Mise en cohérence du tableau d'analyse de sensibilité aux incertitudes, en lien avec l'actualisation du chapitre 8.2.3.1 du présent volume
8.3	Méthodes d'évaluation des incidences sur la santé humaine liées aux émissions radiologiques	x				EI-DAC1	Clarification du schéma représentant la « Démarche générale d'évaluation des incidences radiologiques et du risque sanitaire associé »
8.3.1.1	Populations exposées retenues	x				EI-DAC1	Précisions apportées sur la démarche relative à la localisation et à la sélection des groupes retenus dans l'évaluation de l'exposition humaine aux émissions radioactives
8.3.1.2	Voies d'exposition humaine	x				EI-DAC1	Précisions apportées aux voies d'exposition humaine aux émissions radioactives et à l'outil de calcul CERES
8.3.1.4	Cas particulier du 14C	x				EI-DAC1	Précisions apportées sur les émissions de Carbone 14

Chapitre EI DAC déposée		Précisions sur les caractéristiques techniques	Évolution de l'état initial	Évolution réglementaire	Précision demandée lors de l'instruction du dossier	Actualisation concernée	Précisions sur les évolutions apportées au contenu du volume VI de l'EI EI-DAC1 = étude d'impact de la demande de création de l'INB Cigéo, déposée en 2023 EI-DR0 = étude d'impact des dossiers de la tranche de travaux DR0 EI-DAC2 = étude d'impact associée à la consultations réglementaires de la DAC, déposée en 2025 EI-DAC3 = étude d'impact associée à l'enquête publique de la DAC, déposée en 2026
8.3.1.6	Coefficients de dose retenus	x				EI-DAC1	Actualisation du tableau « Coefficients de dose retenus pour les radionucléides considérés dans les évaluations d'exposition humaine » en lien avec l'actualisation de la modélisation
8.3.2.1	Analyse des incertitudes sur les émissions radioactives	x				EI-DAC1	Précisions apportées sur l'utilisation de l'outil de calcul CERES
8.3.2.4	Analyse des incertitudes sur le risque sanitaire	x				EI-DAC1	Actualisation du chapitre sur les hypothèses prises pour réaliser l'évaluation des risques sanitaires des émissions radioactives
8.4	Méthodes d'évaluation des incidences après fermeture sur la santé humaine	X			X	EI-DAC1	Création d'un chapitre spécifique en cohérence avec la « Pièce EPU7 - Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » du présent dossier, en lien avec les chapitres 11 et 18 du volume IV de la présente étude d'impact
8.5	Méthodes d'évaluation des incidences des situations accidentelles sur la santé humaine	X			X	EI-DAC1	Création d'un chapitre spécifique en cohérence avec la « Pièce EPU7 - Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information » du présent dossier, en lien avec les chapitres 11 et 18 du volume IV de la présente étude d'impact
8.5.1.1	Les objectifs de radioprotection				x	EI-DAC2	Mise en cohérence avec mise à jour EMR
Annexe 1	Évaluation des risques sanitaires spécifiques aux poussières des verses	x				EI-DAC1/EI-DAC2	Ajout d'une annexe présentant l'évaluation des risques sanitaires liés aux poussières des verses Mise en cohérence avec modélisation atmosphérique
2.5	Caractéristiques des sols		x			EI-DAC1	Actualisation des données relatives aux caractéristiques des sols
2.6	Conditions météorologiques		x			EI-DAC1	Actualisation des données sur la période 2015-2019

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1 Population au niveau du centre de stockage Cigéo 8
Figure 1-2 Population au sein de l'aire d'étude spécifique de la ligne 400 kV 9
Figure 1-3 Population le long de la voie ferrée 027000 11
Figure 1-4 Population au niveau de la déviation de la route départementale D60/960, tracé de proximité retenu 12
Figure 2-1 Échelle des niveaux sonores perçus (source : Mangaïa pour la mairie de Paris) 14
Figure 2-2 Exemple de convoyeur à bande en caisson béton 15
Figure 2-3 Propagation acoustique – Aménagements préalables - Toutes sources (Diurne) 17
Figure 2-4 Propagation acoustique - Construction initiale - Toutes sources (diurne) 19
Figure 2-5 Propagation acoustique - Construction initiale - Toutes sources (nocturne) 19
Figure 2-6 Propagation acoustique - Fonctionnement - Toutes sources du projet global Cigéo (diurne) 21
Figure 2-7 Propagation acoustique - Fonctionnement - Toutes sources du projet global Cigéo (nocturne) 21
Figure 2-8 Champs électromagnétiques émis par des appareils et installations de la vie quotidienne 25
Figure 2-9 Illustration des opérations de raccordement sur la ligne électrique 400 kV 27
Figure 3-1 Schéma conceptuel pour les rejets liquides 35
Figure 3-2 Localisation du groupe de référence situé à Bure et des ruisseaux de l'Orge, de La Bureau et de l'Ormançon 36
Figure 3-3 Vue de l'ancienne plateforme ferroviaire et du terrain industriel de Gondrecourt-le-Château 41
Figure 3-4 Vue de l'arrosage de pistes pour limiter l'envol de poussières par temps sec 42
Figure 3-5 Photographie illustrative de refroidisseurs à circuit fermé 42
Figure 3-6 Schématisation des voies d'exposition des populations aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo 46
Figure 4-1 Illustration des trois types de rayonnements ionisants 56
Figure 4-2 Illustration de l'effet de la radioactivité : du becquerel (Bq) au sievert (Sv) 56
Figure 4-3 Illustration des types d'exposition à la radioactivité 57
Figure 4-4 Illustration du passage de la dose absorbée à la dose efficace engagée 58
Figure 4-5 Contributions à une dose liée au bruit de fond radiologique français (fourchette basse de 1,6 mSv/an) 59
Figure 4-6 Contributions à une dose liée au bruit de fond radiologique français (fourchette basse de 8,6 mSv/an) 59
Figure 4-7 Quelques exemples d'exposition de la vie quotidienne 60
Figure 4-8 Photographie d'emballages de transport de déchets radioactifs sur un train 60
Figure 4-9 Illustrations de l'usine de ventilation nucléaire de la zone puits (en haut) et de l'installation nucléaire de surface (en bas) avec leurs cheminées 63
Figure 4-10 Localisation des émissaires de rejets atmosphériques radioactifs du centre de stockage Cigéo 64
Figure 4-11 Schéma présentant les modèles et codes utilisés pour la dispersion atmosphérique et les calculs de dose 65
Figure 4-12 Illustration de l'évaluation des concentrations dans l'air du tritium associé aux rejets du centre de stockage Cigéo 66
Figure 4-13 Illustration de l'évaluation des dépôts au sol de tritium associés aux rejets du centre de stockage Cigéo 66
Figure 4-14 Schématisation du transfert des radionucléides rejetés dans l'atmosphère 67
Figure 4-15 Valeurs repères d'exposition humaine aux émissions radioactives 69
Figure 5-1 Illustration de la décroissance dans le temps de la radioactivité totale des déchets de l'inventaire de référence de l'INB Cigéo (courbe rouge) et de la radioactivité de l'inventaire total des colis de déchets HA0, HA1/HA2 et MA-VL (courbes pointillées) 72
Figure 5-2 Illustration schématique du centre de stockage après sa fermeture définitive 72
Figure 5-3 Schéma illustratif des étapes de la démarche d'évaluation de sûreté après fermeture 74
Figure 5-4 Schéma illustratif des classes et nomenclatures des scénarios de sûreté après fermeture 76
Figure 5-5 Schéma illustratif des composants et des voies de transfert potentielles pris en compte pour du scénario d'évolution normale 77
Figure 5-6 Illustration montrant la différence entre l'évolution normale et une situation possible de défaillance de scellement pouvant induire une "déviation » de l'évolution normale 78
Figure 5-7 Illustration schématique de la représentation du scénario What-if postulant le dysfonctionnement de tous les scellements par rapport aux deux situations du scénario d'évolution normale (SEN) 78
Figure 5-8 Schéma illustratif d'intrusions humaines involontaires par forage retenues pour la sûreté après fermeture 79
Figure 5-9 Schéma illustratif de la localisation des exutoires (i.e. Points de prélèvement d'eau) pour les évaluations d'impact radiologique et toxicologique sur l'homme en après fermeture, avec les trajectoires associées depuis le stockage (en rouge) 79
Figure 5-10 Scénario d'évolution normale – situation de référence, quartiers de stockage HA et MA-VL, iode 129 : bilan (%) de la répartition des voies de transfert dans les composants ouvragés et le milieu géologique depuis les colis jusqu'aux exutoires à million d'années par rapport à l'inventaire total initial (HA + MA-VL) 81
Figure 6-1 Doses maximales autour de la zone descenderie pour l'adulte pour une exposition de 24 heures pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface 89
Figure 6-2 Illustration de la situation accidentelle sévère d'inflammation d'un fût de déchets bitumés dans un colis de stockage 91
Figure 6-3 Doses maximales autour de la zone puits pour l'adulte pour une durée d'exposition de 24 heures pour la situation accidentelle sévère d'inflammation d'un fût de déchets bitumés dans un colis de stockage 92
Figure 8-1 Voies de transfert et d'exposition des émissions chimiques 110
Figure 8-2 Démarche générale d'évaluation des incidences radiologiques et du risque sanitaire associé 114
Figure 8-3 Voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques 115
Figure 8-4 Schéma illustratif du déroulement de l'analyse des risques et incertitudes après fermeture 123
Figure 8-5 Schéma illustratif de l'établissement de la liste de scénarios à quantifier sur la base de l'analyse des risques et incertitudes 123
Figure 8-6 Schéma illustratif de la conceptualisation des scénarios de sûreté après fermeture pour l'évaluation quantitative de sûreté 124
Figure 8-7 Schéma illustratif des voies de contamination d'un individu utilisant de l'eau potentiellement contaminée par des radionucléides extraite par pompage à un exutoire 125
Figure 8-8 Localisation des villages cibles de Saudron, Mandres et Bure par rapport aux zones descenderie et puits 127

Figure 8-9 Représentation schématique des voies de transfert et d'exposition des émissions atmosphériques 127
Figure 8-10 Codes de calcul utilisés pour modéliser la dispersion atmosphérique 128

Tableaux

Tableau 2-1 Échelle d'ambiance sonore 16
Tableau 2-2 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en APR 16
Tableau 2-3 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en CI - période diurne 18
Tableau 2-4 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en CI - période nocturne 18
Tableau 2-5 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en F - période diurne 20
Tableau 2-6 Analyse comparative des résultats du projet global Cigéo en F - période nocturne 20
Tableau 2-7 Champs électriques et magnétiques pour une tension de 400 kV 27
Tableau 2-8 Valeurs moyennes et maximales des champs magnétiques pour une tension de 90 kV, comparées à la limite réglementaire 28
Tableau 3-1 Correspondances entre les étapes de la démarche d'évaluation des risques sanitaires de l'Ineris et leur restitution dans le présent volume VI de l'étude d'impact 30
Tableau 3-2 Caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques et agents infectieux potentiellement présents dans les effluents du projet global Cigéo 31
Tableau 3-3 Catégories des eaux rejetées dans La Bureau, l'Orge et l'Ormançon 34
Tableau 3-4 Valeurs de rejet retenues pour le centre de stockage Cigéo 35
Tableau 3-5 Traceurs de risques associés à la toxicité chimique chronique des substances toxiques chimiques 36
Tableau 3-6 VTR pour les voies orales associées aux effets cancérigènes (sans seuil) (ERU) 37
Tableau 3-7 VTR pour les voies orales associées aux effets non cancérigènes (à seuil) 37
Tableau 3-8 Consommations de produits animaux bovins et gibiers 37
Tableau 3-9 Doses journalières ingérées estimées par traceur chimique pour le groupe de référence (adulte, enfant de 10 ans et enfant d'un an) 38
Tableau 3-10 Quotient de danger pour les effets avec seuil pour le groupe de référence (adulte, enfant de 10 ans et enfant d'un an) 38
Tableau 3-11 Excès de risque individuel (ERI) pour les substances toxiques chimiques disposant d'une VTR sans seuil 39
Tableau 3-12 Caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques contenus dans les émissions atmosphériques du projet global Cigéo 40
Tableau 3-13 Bilan des flux d'émissions chimiques atmosphériques en phase de construction initiale (en tonnes/an) 44
Tableau 3-14 Bilan des émissions chimiques atmosphériques en phase de fonctionnement (en tonnes/an) 45
Tableau 3-15 Liste des substances d'intérêt des émissions atmosphériques du projet global Cigéo 47
Tableau 3-16 Types de dangers (aiguës ou chroniques) associés aux traceurs de risques retenus 47
Tableau 3-17 Existence de valeur toxicologique de référence, de valeur réglementaire ou de gestion, et leur potentiel cancérigène, pour les substances d'intérêts du projet global Cigéo 48
Tableau 3-18 Valeurs toxicologiques de référence pour des expositions par inhalation 48
Tableau 3-19 Valeurs de référence pour le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et les PM10 pour l'évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo (en gras) 49
Tableau 3-20 Concentrations des émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo aux points cibles - Construction initiale 49
Tableau 3-21 Concentrations des émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo aux points cibles – Fonctionnement 50
Tableau 3-22 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour les traceurs de risque disposant d'une VTR avec seuil 51
Tableau 3-23 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour le benzène concerné par les effets sans seuil 51

Tableau 3-24 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour les PM2,5 concernées par les effets sans seuil 52
Tableau 3-25 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo pour le benzo(a)pyrène concerné par les effets sans seuil (sans unité) 52
Tableau 3-26 Analyse du risque global pour les effets additifs sans seuil (sans unité) 53
Tableau 4-1 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation nucléaire de surface du centre de stockage Cigéo 64
Tableau 4-2 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo 64
Tableau 4-3 Concentrations dans l'air et dépôts annuels au sol des radionucléides émis par le centre de stockage Cigéo en phase de fonctionnement, au niveau du village de Bure 67
Tableau 4-4 Rations alimentaires par classe d'âge, issues de l'enquête alimentaire locale (en kg/an) 68
Tableau 4-5 Doses efficaces engagées reçues par la population de Bure, liées aux émissions atmosphériques radioactives du centre de stockage Cigéo 68
Tableau 4-6 Proportion de la dose reçue par la population des autres villages par rapport à celle de Bure 68
Tableau 5-1 Mesures d'évitement et de réduction en regard des principales fonctions de sûreté après fermeture du système de stockage déclinées de l'objectif de protection des intérêts 73
Tableau 6-1 Dose maximale à 24 heures pour l'adulte en conditions météorologiques les plus défavorables autour de la zone descenderie pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface 88
Tableau 6-2 Concentration maximale dans le sol autour du périmètre INB de la zone descenderie pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface 89
Tableau 6-3 Contamination des salades à un an en Bq/kg autour de la zone descenderie pour la situation accidentelle de la chute d'un emballage de transport dans la fosse du hall de déchargement du bâtiment nucléaire de surface 90
Tableau 6-4 Dose maximale à 24 heures pour l'adulte en conditions météorologiques les plus défavorables autour de la zone puits pour la situation accidentelle sévère d'inflammation d'un fût de déchets bitumés dans un colis de stockage 91
Tableau 6-5 Concentration maximale dans le sol à un an en Bq/kg autour de la zone puits pour un accident enveloppe de relâchement des colis de déchets MA-VL conduisant aux concentrations en émetteurs alpha, bêta et gamma les plus importants 92
Tableau 6-6 Contamination des salades à un an en Bq/Kg autour de la zone puits pour un accident enveloppe de relâchement des colis de déchets MA-VL conduisant aux concentrations en émetteurs alpha, béta et gamma les plus importants 92
Tableau 6-7 Synthèse de l'évaluation des situations accidentelles et des impacts radiologiques (doses maximales) ou non radiologiques associés 93
Tableau 8-1 Analyse de sensibilité aux incertitudes sur l'évaluation des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine 113
Tableau 8-2 Débits respiratoires et budgets temps selon l'activité et la classe d'âge (CIPR Publication 89 (27)) 115
Tableau 8-3 Coefficients de dose retenus pour les radionucléides considérés dans les évaluations d'exposition humaine 118
Tableau 8-4 Analyse de sensibilité aux incertitudes sur l'évaluation des incidences liées aux émissions radiologiques sur la santé humaine 120
Tableau 8-5 Objectifs de protection vis-à-vis des risques radiologiques en exploitation 126

Tableau Annexe 1-1 Composition chimique (pourcentage moyen ± écart-type) des argilites du Callovo-Oxfordien (unité argileuse) 130
Tableau Annexe 1-2 Valeurs toxicologiques de référence associées aux éléments chimiques des verses 131
Tableau Annexe 1-3 Analyse du risque sanitaire des poussières issues des verses du centre de stockage Cigéo pour les effets à seuil 132
Tableau Annexe 1-4 Analyse des risques des poussières issues des verses du centre de stockage Cigéo pour les effets sans seuil 132
Tableau Annexe 1-5 Valeurs limites professionnelles disponibles pour les composés minéraux ne disposant de VTR 133
Tableau Annexe 2-1 Facteur de transfert sol/plante (Bq.kg $^{-1}$ de végétal frais)/(Bq.kg $^{-1}$ de sol sec) 134
Tableau Annexe 2-2 Facteur de transfert air-plante (sans dimension) 135
Tableau Annexe 2-3 Facteur de transfert aux produits animaux (j,kg^{-1}) 135
Tableau Annexe 2-4 Rations alimentaires annuelles des animaux (kg.an^{-1}) 136
Tableau Annexe 2-5 Caractéristiques des cultures 136
Tableau Annexe 2-6 Caractéristiques des sols 136
Tableau Annexe 2-7 Conditions de diffusion : À sec 137
Tableau Annexe 2-8 Conditions de diffusion : À pluie (répartition en pour mille) 137
Tableau Annexe 2-9 Conditions de diffusion : B sec (répartition en pour mille) 138
Tableau Annexe 2-10 Conditions de diffusion : B pluie (répartition en pour mille) 138
Tableau Annexe 2-11 Conditions de diffusion : C sec (répartition en pour mille) 139
Tableau Annexe 2-12 Conditions de diffusion : C pluie (répartition en pour mille) 139
Tableau Annexe 2-13 Conditions de diffusion : D sec (répartition en pour mille) 140
Tableau Annexe 2-14 Conditions de diffusion : D pluie (répartition en pour mille) 140
Tableau Annexe 2-15 Conditions de diffusion : E (répartition en pour mille) 141
Tableau Annexe 2-16 Conditions de diffusion : F (répartition en pour mille) 141
Tableau Annexe 2-17 Autres données météorologiques 142

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Décret n° 2022-993 du 7 juillet 2022 déclarant d'utilité publique le centre de stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue Cigéo et portant mise en compatibilité du schéma de cohérence territoriale du Pays Barrois (Meuse), du plan local d'urbanisme intercommunal de la Haute-Saulx (Meuse) et du plan local d'urbanisme de Gondrecourt-le-Château (Meuse). Ministère de la Transition énergétique (2022). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENER2200646D.

2 Cigéo : les documents de référence. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) (2020). Consulté le 02/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference#section-3144.

3 Meaux, M.-L., Schneider, L. Bilan de la concertation : projet de déviation de la route départementale 60/960 lié au projet de centre industriel de stockage géologique (Cigéo) - Concertation préalable du 31 janvier 2022 au 11 mars 2022. Commission nationale du débat public (CNDP) (2022). 41 p. Disponible à l'adresse : https://www.debatpublic.fr/projet-de-deviation-routiere-de-la-rd60-rd960-autour-du-site-de-cigeo-1314.

4 Bruit & Santé : effets biologiques et sanitaires du bruit - Comment lutter contre le bruit ? Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) (2007). 8 p. Disponible à l'adresse : https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2003et1000Sy.pdf.

5 L'échelle des décibels. Bruitparif (2021). Consulté le 05/02/2021. Disponible à l'adresse : https://www.bruitparif.fr/l-echelle-des-decibels/.

6 Arrêté du 23 janvier 1997 relatif à la limitation des bruits émis dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement (version consolidée du 28 août 2011). Ministère de l'Environnement (2011). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENVP9760055A.

7 Lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement dans la région européenne - Résumé d'orientation. Organisation mondiale de la santé (OMS); Bureau Régional de l'Europe (2018). N°WHO/EURO:2018-3287-43046-60258. 8 p. Disponible à l'adresse : https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/343937/WHO-EURO-2018-3287-43046-60258-fre.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

8 Vibrations et chocs mécaniques - Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 2 : vibrations dans les bâtiments (1 Hz à 80 Hz). Association française de normalisation (Afnor) (2014), NF ISO 2631-2.

9 Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°ATEP9870017A.

10 Research on Power-Frequency Fields Completed Under the Energy Policy Act of 1992. National Academic Press; National Research Council (1999). ISBN : 978-0-585-10273-3.

11 Draper, G., Vincent, T., Kroll, M.E., Swanson, J. Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. British Medical Journal (BMJ) (2005). Vol. 330, N°7503, pp.1290.

12 Bunch, K.J., Keegan, T.J., Swanson, J., Vincent, T., Murphy, M. Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines: childhood cancer risk in Britain 1962–2008. British Journal of Cancer (2014). Vol. 110, pp.1402–1408.

13 Pedersen, C., Johansen, C., Schüz, J., Olsen, J.H., Raaschou-Nielsen, O. Residential exposure to extremely low-frequency magnetic fields and risk of childhood leukaemia, CNS tumour and lymphoma in Denmark. British Journal of Cancer (2015). Vol. 113, pp.1370–1374.

14 Champs électromagnétiques et santé publique - Exposition aux champs de fréquence extrêmement basse - Aide-mémoire n° 322. Organisation mondiale de la santé (OMS) (2007). Consulté le 17/09/2025. Disponible à l'adresse : https://web.archive.org/web/20180226182911/http:/www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322/fr/.

15 Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz) (1999/519/CE). Conseil de l'Union européenne (1999). Journal officiel des Communautés européennes (JOCO), N°L199, pp.59–70.

16 Arrêté du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique (version consolidée au 25 août 2023). Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement; Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement; Secrétaire d'État à l'Industrie (2023). Journal officiel de la République française (JORF), N°ECOI0100130A.

17 Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine - Partie 1 : exigences applicables aux instruments de mesure. Association française de normalisation (Afnor) (2014), NF EN 61786-1.

18 Champs électriques et magnétiques générés par les systèmes d'alimentation à courant alternatif - Procédures de mesure des niveaux l'exposition du public. Commission électrotechnique internationale (CEI),, Association française de normalisation (Afnor) (2009), CEI 62110.

19 Protocole pour la mesure in situ des champs magnétiques 50 Hz générés par les ouvrages de transport d'électricité. Union technique de l'électricité (Ute)., Association française de normalisation (Afnor) (2010), UTE C99-132.

20 Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires - Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées (2ème édition, septembre 2021). Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (2021). N°Ineris-200357-2563482-v1.0. 130 p. Disponible à l'adresse : https://www.ineris.fr/fr/evaluation-etat-milieux-risques-sanitaires.

21 Note technique du 22 février 2019 relative à la prise en compte des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact des infrastructures routières. Ministère de la Transition écologique et solidaire; Ministère des Solidarités et de la Santé (2019), N°TRET1833075N.

22 Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique (version consolidée au 1er janvier 2023). Ministère de la Santé et des Solidarités (2023). Journal officiel de la République française (JORF), N°SANP0720201A.

23 Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (version consolidée au 20 novembre 2014). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2014). Journal officiel des Communautés européennes, N°CELEX:32000L0060.

24 Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement (version consolidée au 31 août 2018). Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVO1001032A.

25 Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e édition intégrant le premier additif. Organisation mondiale de la santé (OMS) (2017). ISBN : 78-92-4-254995-9.

26 Enquête alimentaire sur la zone OPE du Centre Meuse Haute-Marne de l'Andra - Synthèse des résultats. Andra (2015). Document N°SURNTASSE140009.

27 ICRP Publication 89: Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: Reference values. Annals of the International commission on radiological protection (ICRP) (2002). Vol. 32, N°3-4, 282 p.

28 Valeurs toxicologiques de référence - Les particules de l'air ambiant extérieur - Avis de l'Anses : rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire alimentaire (Anses) (2023). 310 p. Disponible à l'adresse : https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2019SA0198Ra.pdf.

29 Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air - Particules (PM2,5 et PM10), ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone : résumé d'orientation. Organisation mondiale de la santé (OMS) (2021). ISBN : 978-92-4-003542-3.

30 Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2012. Synthèse des résultats du réseau de surveillance de l'IRSN. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2013). N°PRP ENV SESURE 2013 34. 29 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN_Surveillance-Polynesie-2012_SESURE-2013-34.pdf.

31 Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2015 à 2017 : rapport de mission 2018. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2018). N°DG/2018-00006. 354 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN-ENV_Bilan-Radiologique-France-2015-2017.pdf.

32 Guide d'aide à la décision pour la gestion du milieu agricole en cas d'accident nucléaire - Version 2012. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN); Association de coordination technique agricole (Acta) (2012). 100 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN_Guide-ACTA_2012.pdf.

33 Rayonnements ionisants : dossier. Institut national de recherche et de sécurité (INRS) (2021). Consulté le 26/01/2022. Disponible à l'adresse : https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/effets-sur-la-sante.html.

34 Eckerman, K.F., Ryman, J.-C. Federal guidance report n°12: External exposure to radionuclides in air, water, and soil. United States Environmental Protection Agency (EPA) (1993). N°EPA 402-R-93-081. 238 p. Disponible à l'adresse : https://www.epa.gov/radiation/federal-guidance-report-no-12-external-exposure-radionuclides-air-water-and-soil.

35 External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2019). N°FGR-15; EPA-402/R19/002. 346 p. Disponible à l'adresse : https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/fgr_15_final_508_2019aug02.pdf.

36 ICRP Publication 144: Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources. Annals of the International commission on radiological protection (ICRP) (2020). Petoussi-Henss, N., Satoh, D., Endo, A., Eckerman, K. F., Bolch, W. E., Hunt, J., Jansen, J.T.M., Kim, C. H., Lee, C., Saito, K., Schlattl, H., Yeom, Y. S., Yoo, S. J. Vol. 49, N°2, 2 p.

37 Arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. Ministère de la Transition écologique (2023). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENEP2327278A.

38 ICRP Publication 71: Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - Part 4: Inhalation dose coefficients. Annals of the International commission on radiological protection (ICRP) (1996). Vol. 25, N°3-4, 405 p.

39 Le bruit de fond des radionucléides artificiels dans l'environnement français métropolitain : bilan des constats radiologiques régionaux. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2022). 152 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_Rapport%20Bruit%20de%20fond_VF.pdf.

40 Exposition de la population française aux rayonnements ionisants : bilan 2014-2019. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2021). N°IRSN /2021-00108. 88 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiques_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_Rapport%20EXPOP_def.pdf.

41 Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (version consolidée au 24 septembre 2018). Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement; Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, chargé de l'Industrie, de l'Énergie et de l'Économie numérique (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVP1202101A.

42 Monfort, M., Duchenne, C. Description des modèles du code GASCON de la plate-forme CERES destiné à l'évaluation de la dispersion atmosphérique et des conséquences sur l'homme et l'environnement de radionucléides émis en fonctionnement normal. Commissariat à l'énergie atomique (CEA) (2011). N°SIM SCGCI RBC NT 11000608 A. 48 p.

43 Montfort, M., Lambert Wentzler, L., Patryl, L., Armand, P. Présentation de la plate-forme CERES destinée à l'évaluation des conséquences sanitaires des rejets de polluants dans l'environnement. Radioprotection (2019). Vol. 54, N°3, pp.195-201.

44 Dossier de validation du logiciel ARIA Impact. Aria Technologies (2009). N°ARIA/2007/105. 29 p.

45 Durand, V., Leclerc, E., Renaud, P. The consumption of locally-produced foodstuff: An important parameter of the radiological exposure for population living in the vicinity of French nuclear facilities. Radioprotection (2018). Vol. 53, N°3, pp.185-192.

46 Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire alimentaire (Anses); Ministère des Solidarités et de la Santé; Santé Publique France (2017). 566 p. Disponible à l'adresse : https://www.anses.fr/fr/content/inca-3-evolution-des-habitudes-et-modes-de-consommation-de-nouveaux-enjeux-en-mati%C3%A8re-de.

47 Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (guide de l'ASN). Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008). N°1. 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/guide_RFSIII_2_fV1_2_.

48 Dossier d'enquête publique unique - Tranche de travaux DR0. Pièce EPU7 - Étude de maîtrise des risques du dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo - Pour information. Andra (2024). Document N°CG-01-D-ERQ-AMOA-SR0-0100-23-0001.

49 Le dossier 2005. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) (2005). Consulté le 29/07/2021. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference#section-967.

50 Stockage réversible profond - Étape 2009. Options de conception du stockage en formation géologique profonde. Andra (2010). Document N°DCOM/DIR/10-0109. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/394.pdf.

51 Stockage réversible profond - Étape 2009. Stockage réversible profond - Étape 2009 - Options de réversibilité du stockage en formation géologique profonde. Andra (2010). Document N°DCOM/DIR/10-0108. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/393.pdf.

52 Stockage réversible profond - Étape 2009. Stockage réversible profond - Étape 2009 - Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde. Andra (2010). Document N°DCOM/DIR/10-0107. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/392.pdf.

53 Stockage réversible profond - Étape 2009. Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation de surface. Andra (2010). Document N°DCOM/DIR/10-0106. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/391.pdf.

54 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.

55 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.

56 Integration Group for the Safety Case. NEA IGSC Scenario Development Workshop, 1-3 June 2015, Issy-les-Moulineaux, France. Organisation for Economic Co-operation and Developmen (OECD) Publishing (2016). Vol. NEA-RWM-R-2015-3.

57 Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011). N°SSR 5. 62 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1449_web.pdf.

58 Installations nucléaires - Critères pour la conception et l'exploitation des systèmes de ventilation des installations nucléaires autres que les réacteurs nucléaires. Association française de normalisation (Afnor) (2006), NF ISO 17873.

59 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.

60 Création de l'Observatoire de la santé des riverains du projet de centre de stockage de Bure (OSaRiB). Santé Publique France (2022). Consulté le 12/12/2022. Disponible à l'adresse : https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2022/creation-de-l-observatoire-de-la-sante-des-riverains-du-projet-de-centre-de-stockage-de-bure-osarib.

61 Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières. Ministère de l'Environnement; Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du territoire; Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme; Ministère du Logement; Ministère délégué à l'Aménagement du territoire et aux collectivités locales (1995). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENVP9540148A.

62 Arrêté du 8 novembre 1999 relatif au bruit des infrastructures ferroviaires. Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement; Ministère de l'Intérieur; Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement; Secrétariat d'État au logement (1999). Journal officiel de la République française (JORF), N°ATEP9980383A.

63 Arrêté préfectoral n° 2000-1269 portant réglementation des bruits de voisinage dans le département de la Meuse. Préfecture de la Meuse (2000).

64 Arrêté préfectoral n° 3143 du 11 décembre 2008 relatif à la lutte contre les bruits du voisinage. Préfecture de la Haute-Marne (2008).

65 Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement. Ministère délégué de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du territoire et des Transports, chargé de l'Environnement (1986). Journal officiel de la République française (JORF), pp.12742.

66 Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières (version consolidée au 25 octobre 2018). Ministère de l'Environnement (2018). Journal officiel de la République française (JORF), N°ENVP9430348A.

67 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics (2010). Vol. 99, N°6, pp.818–836.

68 Circulaire du 9 août 2013 relative à la démarche de prévention et de gestion des risques sanitaires des installations classées soumises à autorisation. Ministère des Affaires sociales et de la Santé; Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2013). Bulletin officiel du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, N°DEVP1311673C.

69 Évaluation des risques sanitaires dans les analyses de zone : utilité, lignes méthodologiques et interprétation. Haut Conseil de la santé publique (2010). 89 p. Disponible à l'adresse : https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspr20101221_ersaz.pdf.

70 Note d'information N° DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués. Direction générale de la prévention des risques (DGPR); Direction générale de la santé (DGS) (2014). Bulletin officiel du Ministère des Affaires sociales, de la Santé et des Droits des femmes, N°AFSP1426092N.

71 Décret n° 2021-1763 du 23 décembre 2021 portant modification des concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires dans les locaux à pollution spécifique. Ministère du Travail, de l'Emploi et de l'Insertion (2021). Journal officiel de la République française (JORF), N°MTRT2133610D.

72 Directive n° 98/70/CE du 13/10/98 concernant la qualité de l'essence et les carburants diesel et modifiant la directive 93/12/CEE du Conseil (version consolidée au 20 novembre 2023). Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2023). Journal officiel des Communautés européennes (JOCO), N°CELEX:01998L0070.

73 Arrêté du 3 août 2018 modifié relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale inférieure à 50 MW soumises à autorisation au titre des rubriques 2910, 2931 ou 3110. Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Journal officiel de la République française (JORF).

74 Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA 006) - Omega 12 - Dispersion atmosphérique (mécanismes et outils de calcul). Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (2002). N°INERIS DRA 2002 25427. 64 p. Disponible à l'adresse : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/46web.pdf.

75 Classification of Radioactive Waste. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2009). N°STI/PUB/1419. 68 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf.

76 International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2010). N°472. 208 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf.

77 ARIA Impact - Note de principe et notice d'utilisation (version 1.8). Aria Technologies (2013). 224 p.

78 ICRP Publication 66: Human respiratory tract model for radiological protection. Elsevier science Ltd (1994). N°66. 482 p. Disponible à l'adresse : https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_24_1-3.

79 Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom. Conseil de l'Union européenne (2014). Journal officiel de l'Union européenne, N°CELEX:32013L0059.

80 Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants (version initiale). Ministère de la Santé, de la Famille et des Personnes handicapées; Ministère des Affaires sociales, du Travail et de la Solidarité; Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires rurales (2003). Journal officiel de la République française (JORF), N°SANC0323527A.

81 Comparaison des résultats des codes de dispersion atmosphérique et de conséquences radiologiques utilisés en situation d'urgence par le CEA et l'IRSN. Commissariat à l'énergie atomique (CEA) (2013). N°VAL CEACI RBC DET 11000429 B. 60 p.

82 Monfort, M. Comparaison des codes de calcul de dispersion atmosphérique en fonctionnement normal GASCON et COTRAM. Commissariat à l'énergie atomique (CEA) (2011). N°SIM CEACI RBC DET 110000104 A. 19 p.

83 "Reference biospheres" for solid radioactive waste disposal - Report of biomass theme 1 of the Biosphere modelling and Assessment (BIOMASS) programme. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2003). N°IAEA-BIOMASS-6. 560 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Biomass6_web.pdf.

84 Grare, R. Problématiques liées au calcul de la dose efficace engagée lors d'une contamination interne digestive par une particule de Cobalt 60 en centrale nucléaire de production d'électricité (2017). Université de Bordeaux 1. Thèse de doctorat, spécialité Médecine du travail. 87 p.

85 ICRP Publication 134: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. Annals of the International commission on radiological protection (ICRP) (2016). Vol. 45, N°3-4, 343 p.

86 ICRP Publication 130: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. Annals of the International commission on radiological protection (ICRP) (2015). Paquet, F.,Etherington, G.,Bailey, M.R.,Leggett, R.W.,Lipsztein, J.,Bolch, W.,Eckerman, K.F.,Harrison, J.D. Vol. 44, N°2, 192 p.

87 Décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air. Premier ministre (2010). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVE1016116D.

88 Post-closure safety case for geological repositories: nature and purpose. Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE); Nuclear Energy Agency (NEA) (2004). N°NEA 3679. 56 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2004/nea3679-closure.pdf.

89 Methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste: Outcomes of the NEA MeSA initiative. Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE); Nuclear Energy Agency (NEA) (2012). N°NEA 6923. 242 p.

90 Règlement (Euratom) 2016/52 du Conseil du 15 janvier 2016 fixant les niveaux maximaux admissibles de contamination radioactive pour les denrées alimentaires et les aliments pour animaux après un accident nucléaire ou dans toute autre situation d'urgence radiologique et abrogeant le règlement (Euratom) n° 3954/87 et les règlements (Euratom) n° 944/89 et n° 770/90 de la Commission. Conseil de l'Union européenne (2016). Journal officiel de l'Union européenne, N°CELEX: 32016R0052.

91 Arrêté du 29 septembre 2005 relatif l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Ministère de l'Écologie et du Développement durable (2005). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVP0540371A.

92 Arrêté du 29 mai 2009 relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (dit « arrêté TMD », version consolidée au 29 mars 2025). Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire; Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (2025). Journal officiel de la République française (JORF), N°DEVP0911622A.

93 Gaucher, E., Robelin, C., Matray, J.-M., Négrel, G., Gros, Y., Heitz, J.F., Vinsot, A., Rebours, H., Cassagnabere, A., Bouchet, A. Andra underground research laboratory: Interpretation of the mineralogical and geochemical data acquired in the Callovian-Oxfordian formation by investigative drilling. Physics and Chemistry of the Earth (2004). Vol. 29, N°1, pp.55–77.

94 Belcourt, O. La perturbation chimico-minéralogique (hydratation, état d'oxydation et eau interstitielle) de la zone perturbée excavée et ses relations avec la perturbation texturale et mécanique : application aux argilites des galeries de Bure (2009). Université Henri Poincaré - Nancy 1. Thèse de doctorat, spécialité Géosciences. 339 p.

95 Marty, N., Lach, A., Lerouge, C., Grangeon, S., Claret, F., Fauchet, C., Madé, B., Lundy, M., Lagroix, F., Tournassat, C., Tremosa, J. Weathering of an argillaceous rock in the presence of atmospheric conditions: a flow-through experiment and modelling study. Applied geochemistry (2018). Vol. 96, pp.252–263.

96 Décret n° 2021-837 du 29 juin 2021 portant diverses réformes en matière d'évaluation environnementale et de participation du public dans le domaine de l'environnement. Premier ministre (2021). Journal officiel de la République française (JORF), N°TRED2031037D.

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