

2021

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

Pièce 6

Etude d'impact du projet global Cigéo

Volume VI

Incidences sur la santé humaine



SIAEP d'Échenay

SIVU du Haut Orain



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

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

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

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

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

Sommaire

1.	Évaluation des incidences liées aux émissions physiques sur la santé humaine	7
1.1	Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions physiques	8
1.1.1	Les sources d'émissions de bruit et leurs incidences potentielles	8
1.1.2	Les sources d'émissions de vibrations et leurs incidences potentielles	9
1.1.3	Les sources d'émissions lumineuses et leurs incidences potentielles	9
1.1.4	Les sources d'émissions d'odeurs et leurs incidences potentielles	9
1.1.5	Les sources d'émissions électromagnétiques et leurs incidences potentielles	10
1.2	Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions physiques	12
1.2.1	Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions de bruit	12
1.2.2	Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions de vibrations	13
1.2.3	Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions lumineuses	13
1.2.4	Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions d'odeurs	13
1.2.5	Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions électromagnétiques	13
1.3	Incidences résiduelles liées aux émissions physiques sur la santé humaine	14
1.3.1	Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions de bruit	14
1.3.2	Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions de vibrations	15
1.3.3	Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions lumineuses	15
1.3.4	Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions d'odeurs	16
1.3.5	Les incidences résiduelles liées aux émissions électromagnétiques	16
1.4	Synthèse des incidences liées aux émissions physiques sur la santé humaine	17
2.	Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine	19
2.1	Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions chimiques	20
2.1.1	Les sources d'émissions chimiques liquides et leurs incidences potentielles	21
2.1.2	Les sources d'émissions chimiques atmosphériques et leurs incidences potentielles	23
2.2	Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques	25
2.2.1	Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques liquides	25
2.2.2	Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques atmosphériques	25
2.3	Incidences résiduelles liées aux émissions chimiques sur la santé humaine	26
2.3.1	La caractérisation des émissions chimiques	26
2.3.2	L'exposition humaine et les risques sur la santé humaine liés aux émissions chimiques	30
2.3.3	L'appréciation des incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions chimiques	33
2.4	Synthèse des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine	34
3.	Évaluation des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine	35

3.1	Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions radioactives	36
3.1.1	Les rayonnements ionisants et leurs effets sur la santé humaine	36
3.1.2	Les sources d'émissions radioactives du projet global Cigéo et leurs incidences potentielles	40
3.2	Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions radioactives	41
3.2.1	Le conditionnement des déchets radioactifs	41
3.2.2	La conception des emballages de transport	42
3.2.3	La conception des installations du centre de stockage Cigéo	42
3.3	Incidences résiduelles liées aux émissions radioactives sur la santé humaine	43
3.3.1	Les émissions radioactives liquides	43
3.3.2	Les émissions radioactives atmosphériques	44
3.3.3	L'exposition humaine et les risques sur la santé humaine liés aux émissions radioactives	52
3.3.4	L'appréciation des incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions radioactives	54
3.4	Synthèse des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine	54
	Tables des illustrations	57
	Références bibliographiques	59

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
VOLUME IV	Évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences
VOLUME V	Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000
VOLUME VI	Incidences sur la santé humaine
VOLUME VII	Méthodes de réalisation

Le présent **VOLUME VI** est consacré à la présentation des incidences du projet global Cigéo sur la santé humaine, identifiées grâce à l'évaluation des risques sanitaires (ERS) liés aux émissions du projet lors de ses phases d'aménagements préalables, de construction initiale et de fonctionnement. Les incidences à long terme, après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo sont présentées au chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact et synthétisées ici.

Le projet global Cigéo est conçu de façon à éviter au maximum les émissions :

- en appliquant une approche intégrée de la prévention et de la réduction des pollutions émises par ses installations ;
- en appliquant « *le principe d'optimisation, selon lequel le niveau de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants résultant d'une de ces activités, la probabilité de la survenue de cette exposition et le nombre de personnes exposées doivent être maintenus au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état des connaissances techniques et des facteurs économiques et sociétaux* » (article L. 1333-2 du code de la santé publique), appelé principe ALARA « *As Low As Reasonably Achievable* ».

L'évaluation des incidences sur la santé humaine vise à apprécier les effets induits par les émissions liées aux activités du projet sur la santé des populations environnantes. Cette évaluation est basée sur une estimation des risques sanitaires. Il ne s'agit pas d'une étude descriptive de la santé des populations (étude épidémiologique), mais d'études prospectives établies avec des méthodologies spécifiques à chaque type d'émission. Elle constitue un outil d'aide à la décision permettant de démontrer, le cas échéant, l'absence d'effet notable et/ou de risque préoccupant pour la santé des populations liés aux émissions prévisionnelles du projet. Elle sert à qualifier l'incidence sur la santé humaine dans la présente étude d'impact. Une synthèse des résultats de cette évaluation est également présentée au chapitre 13.6 du volume IV de la présente étude d'impact.

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions physiques (bruit, vibrations, champs électromagnétiques...), chimiques (matières en suspension, poussières...) et radioactives (gaz et effluents liquides).

L'évaluation des risques sanitaires (et incidences sur la santé) liés à ces émissions repose, lorsqu'elles existent, sur des méthodes éprouvées et intègre l'état de l'art des connaissances scientifiques :

- pour les émissions physiques, l'évaluation des risques sanitaires (et incidences sur la santé humaine) se base sur l'analyse des résultats d'études scientifiques ayant conduit à des recommandations ou à la détermination de seuils de nuisance ;
- pour les émissions chimiques, les risques sanitaires (et incidences sur la santé humaine) sont étudiés conformément aux dispositions définies par le Ministère en charge de l'environnement pour l'établissement des évaluations des risques sanitaires pour les études d'impact ;
- pour les émissions radiologiques, les risques sanitaires (et incidences sur la santé humaine) sont évalués en réalisant un calcul de dose à l'homme selon les préconisations de la réglementation relative aux installations nucléaires de base (1).

Pour rappel, l'homme est constamment soumis, dans son environnement, à la radioactivité du fait des éléments radioactifs présents dans le sol, les végétaux, les animaux et l'atmosphère depuis la formation de la terre. Au quotidien, il inhale des poussières provenant du sol et de végétaux mises en suspension, contenant des particules atmosphériques radioactives et des gaz comme le radon présent dans l'air. Il avale également les éléments radioactifs naturellement contenus dans l'eau et les aliments. L'homme émet d'ailleurs lui-même des rayonnements radioactifs du fait des éléments radioactifs qui le composent (¹⁴C, ⁴⁰K, etc.).

En France, la dose moyenne reçue par la population française est de l'ordre de 2,9 mSv/an. Par ailleurs, 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 les travailleurs du nucléaire soumis aux rayonnements ionisants, la limite fixée par le code du travail (article R. 4451-6) est de 20 mSv sur une période consécutive de 12 mois.

Il est à noter que la dose de 1 mSv/an est considérée en radioprotection comme une dose très faible. Le risque de développer un cancer au cours de sa vie est important à partir d'une dose supérieure à 100 mSv/an et une dose de 5 Sv (soit 5 000 mSv) reçue en un court laps de temps est létale pour une personne sur deux.

Les méthodes détaillées d'évaluation des risques sanitaires et incidences sur la santé humaine liées aux émissions radioactives et chimiques sont présentées au chapitre 17 du volume VII de la présente étude d'impact).

Les évaluations de risques sanitaires et des incidences sur la santé du projet global Cigéo sont présentées successivement, au chapitre 1 liées aux émissions physiques, au chapitre 2 liées aux émissions chimiques et au chapitre 3 liées aux émissions radioactives. Pour chaque type d'émission, les sources de dangers et leurs incidences potentielles sur la santé humaine sont tout d'abord exposés. Les mesures visant à éviter et si ce n'est pas possible, à réduire au maximum les incidences notamment vis-à-vis de la santé humaine sont ensuite présentées. L'évaluation des risques sanitaires et des incidences résiduelles sur la santé humaine est enfin restituée, en précisant les zones d'incidence maximale. Cette dernière évaluation est réalisée par comparaison des niveaux d'exposition résiduelle estimés avec les indicateurs et objectifs de protection, issus de la réglementation et des meilleures connaissances scientifiques disponibles.

Les opérations de démantèlement et de fermeture interviendront dans plusieurs décennies et bénéficieront des évolutions technologiques sur les engins et matériels utilisés notamment dans le secteur du bâtiment et des installations nucléaires. La souplesse possible d'organisation dans l'espace et le temps de ces opérations permettra également d'en réduire les impacts. À ce stade leur définition détaillée n'est pas encore figée mais les grands types d'opérations et d'incidences sont présentés au chapitre 18.1 du volume IV de la présente étude d'impact. Leurs incidences sur la santé humaine seront précisées lors d'une actualisation ultérieure de l'étude d'impact.

Ensuite, une fois le centre de stockage ayant eu l'autorisation d'être définitivement fermé, l'ensemble de l'installation souterraine (y compris les liaisons surface-fond) aura été remblayé et l'installation nucléaire de surface aura été démantelée. Les autres activités en surface seront fortement réduites, essentiellement liées à la surveillance du site et de l'environnement. Les déchets radioactifs seront isolés de l'homme et de l'environnement, notamment grâce à la couche du Callovo-Oxfordien, située à environ 500 m de profondeur et âgée d'environ 160 millions d'années, qui constitue une barrière naturelle entre le stockage et l'environnement de surface. En effet, les études scientifiques menées depuis plusieurs années, notamment dans le Laboratoire souterrain, montrent que l'essentiel des éléments radioactifs restent piégés dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage. Seuls quelques éléments radioactifs solubles, non retenus par l'argile et

à vie longue (comme l'¹²⁹I, le ³⁶Cl et le ⁷⁹Se) migreront dans la couche du Callovo-Oxfordien par diffusion donc de manière très lente et limitée. Cela prendra à minima plusieurs centaines de milliers d'années avant qu'ils n'atteignent des exutoires (lieux de prélèvement possible d'eau par pompage). Les risques sanitaires (et incidences sur la santé) après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo sont appréciés sur une période de l'ordre du million d'année et de manière prudente et pénalisante, supposant que les humains du futur viendraient notamment utiliser les eaux arrivant des formations géologiques au-dessus et en dessous de la couche du Callovo-Oxfordien pour leurs activités. Leur évaluation est présentée au chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact et les résultats sont restitués au chapitre 3.3.3.3 du présent volume de l'étude d'impact.

» ÉTUDE D'IMPACT ET PROJET GLOBAL CIGÉO

La présente étude d'impact identifie et apprécie les incidences sur l'environnement du projet global Cigéo comprenant le centre de stockage Cigéo et l'ensemble des opérations (installations, aménagements, constructions d'ouvrages et activités) nécessaires à la réalisation et à l'exploitation du centre de stockage Cigéo, menées par l'Andra et par d'autres maîtres d'ouvrage, en l'état actuel de leurs avancements.

De par la nature et les dimensions du centre de stockage Cigéo, ses incidences sur l'environnement constituent la part majeure des incidences de l'ensemble des opérations du projet global, même si les opérations des autres maîtres d'ouvrages sont également susceptibles d'avoir des incidences spécifiques sur l'environnement notamment de par leur localisation.

Compte tenu des nombreuses autorisations qui seront nécessaires à la réalisation de ce projet global Cigéo (autorisation de création d'une installation nucléaire de base, autorisations environnementales, permis de construire, etc.), cette étude d'impact sera actualisée dans le cadre des procédures propres à l'instruction de chacune de ces autorisations. Cette actualisation permettra, dans le respect du principe de proportionnalité¹, d'assurer l'exhaustivité et la qualité de l'évaluation des incidences environnementales du projet global Cigéo et de donner le niveau d'information requis pour chaque dossier en application du principe de spécialité².

Les maîtres d'ouvrage assureront ensemble, au travers desdites actualisations, l'évaluation complète des incidences du projet global, y compris les mesures adéquates d'évitement, de réduction, et le cas échéant de compensation.

Les opérations des autres maîtres d'ouvrages liées au fonctionnement du centre de stockage Cigéo ne sont pas aux mêmes stades d'avancement de leurs conceptions et de leurs processus de concertation et de validation. Ces opérations sont approfondies progressivement. Elles feront l'objet de procédures d'autorisation après l'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage.

¹ Principe de proportionnalité : (Guide THEMA du Commissariat « Le principe de proportionnalité dans l'évaluation environnementale, août 2019 (2) ») : principe cardinal de l'évaluation environnementale qui consiste à adapter le contenu de l'étude d'impact à l'ampleur du projet, plan ou programme, et aux enjeux environnementaux du territoire d'implantation. Il repose sur les trois critères suivants : 1) la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet (milieu urbain/rural, occupation de l'espace, présence d'espèces et/ou d'habitats protégés...) ; 2) l'importance et la nature

des travaux, ouvrages et aménagements projetés pour les projets (type de projet, caractéristiques techniques...) ; 3) les incidences prévisibles du projet, plan ou programme au regard des enjeux environnementaux et de la santé humaine.

² Principe de spécialité : principe selon lequel chaque branche du droit est régie à la fois par des règles communes (appelés aussi principes généraux), mais aussi par des règles particulières applicables en compléments de ces principes généraux.

1

Évaluation des incidences liées aux émissions physiques sur la santé humaine

1.1	Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions physiques	8
1.2	Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions physiques	12
1.3	Incidences résiduelles liées aux émissions physiques sur la santé humaine	14
1.4	Synthèse des incidences liées aux émissions physiques sur la santé humaine	17

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions de bruit, de vibrations, de lumière, d'odeurs et de champs électromagnétiques.

L'évaluation des incidences sur la santé humaine se base sur l'analyse des résultats d'études scientifiques ayant conduit à des recommandations d'experts nationaux et internationaux ou à la détermination de seuils de nuisance et/ou de seuils réglementaires pour la protection de la santé des populations.

1.1 Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions physiques

Les émissions « physiques » du projet global Cigéo et leurs incidences sur le cadre de vie sont détaillées dans le chapitre 13 du volume IV de la présente étude d'impact. Il s'agit principalement d'émissions de bruit, de vibrations, d'émissions lumineuses, d'odeurs et de champs électromagnétiques.

1.1.1 Les sources d'émissions de bruit et leurs incidences potentielles

L'échelle utilisée pour caractériser les niveaux sonores s'exprime en décibel (dB(A)). L'échelle des décibels monte jusque 200 dB(A), ce qui correspond, approximativement, à une fusée au décollage. Le 0 dB(A) quant à lui, 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)).

Les sons audibles se situent entre 0 dB(A) (seuil d'audition) et 140 dB(A). Les niveaux sonores de notre vie quotidienne sont plutôt compris entre 30 dB et 90 dB (cf. Figure 1-1). Les niveaux sonores situés au-delà de 90 dB(A) proviennent essentiellement de la vie professionnelle (industrie) ou de certains hobbies (musique).

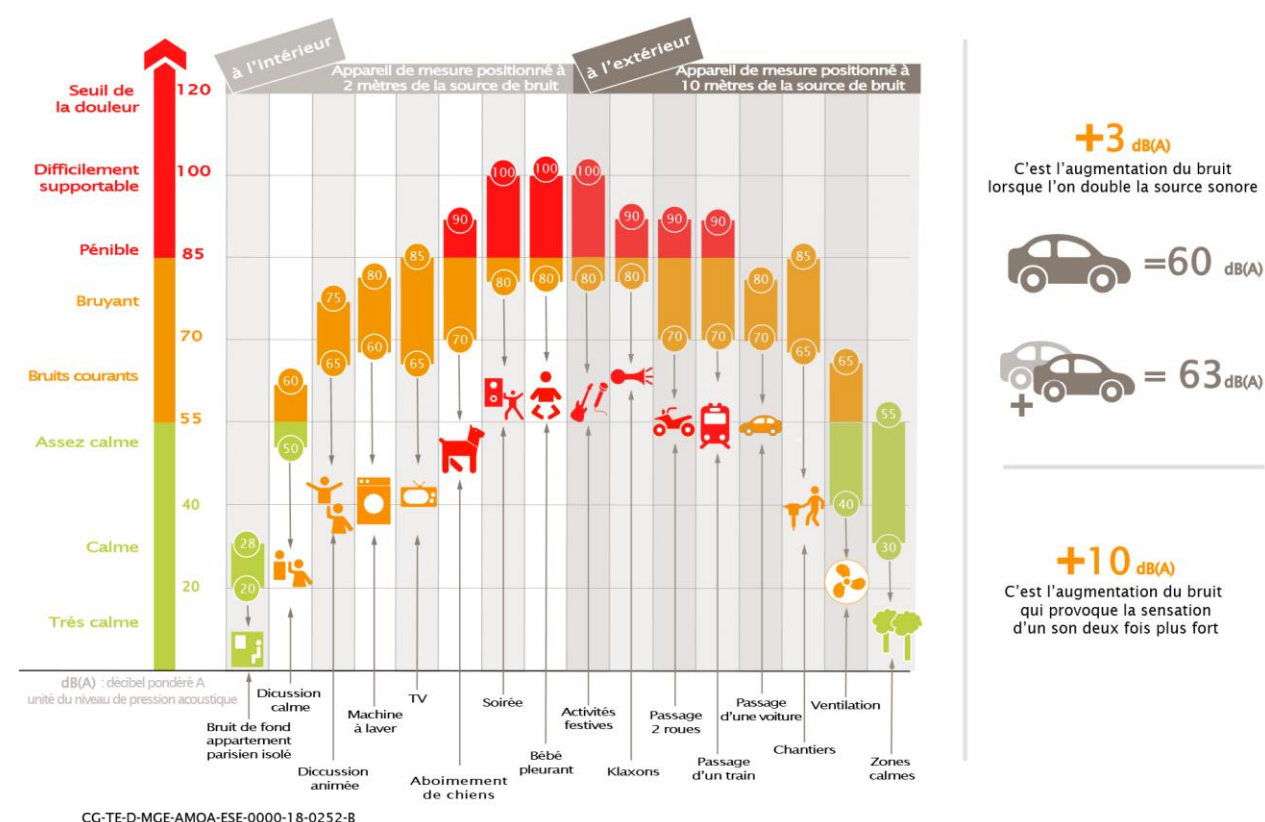


Figure 1-1 Échelle des niveaux sonores perçus

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 13.3 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 de l'installation terminale embranchée et de la ligne ferroviaire 027000).

1.1.1.1 Les émissions de bruit du projet global

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).

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, en phase d'aménagements préalables, sur une durée de 1 à 3 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 les principales sources de bruit associées sont liées aux engins de chantier.

Les travaux d'aménagements préalables et de construction initiale sur les zones puits et descendrière du centre de stockage Cigéo sont prévus sur une durée plus importante (une dizaine d'années). Les sources de bruit sont plus 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 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 et matériaux.

1.1.1.2 Les incidences potentielles du bruit sur la santé humaine

Le bruit peut entraîner des effets sur la santé des populations 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.) (3). 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).

Le bruit a 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.

Les incidences potentielles 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 lorsqu'ils interviennent la nuit.

Pour rappel, la réglementation française fixe des seuils à ne pas dépasser, de l'ordre 60-70 décibels (dB(A)) pour les infrastructures routières et ferroviaires, et impose de limiter l'augmentation du volume sonore à quelques décibels pour les installations classées pour l'environnement et pour les installations nucléaires au niveau des habitations les plus proches.

Les experts de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), dans leur rapport sur le bruit environnemental de 2018 (4), recommandent de ne pas dépasser un seuil de 53 décibels (dB(A)) en journée et un seuil de 45 dB(A) la nuit, pour le trafic automobile, et un seuil de 55 décibels (dB(A)) en journée et un seuil de 44 dB(A) la nuit, pour le trafic ferroviaire. Les seuils fixés par la réglementation applicable en France sont supérieurs à ces recommandations.

Les ouvrages électriques construits après 2007 sont soumis en matière de bruit aux prescriptions de l'article 12 ter de l'arrêté technique du 17 mai 2001 (5) fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique. Cet article 12 ter, introduit dans l'arrêté technique par un arrêté du 26 janvier 2007, fait suite au décret n° 2006-1099 du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage et modifiant le code de la santé publique qui a exclu notamment les ouvrages du réseau de transport d'électricité et a renvoyé à l'arrêté technique le soin de fixer les prescriptions en la matière.

Ainsi, l'article 12 ter prévoit que doivent être respectées les valeurs suivantes :

- 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.

Aucun seuil n'est fixé par la réglementation pour les chantiers de construction, hormis par d'éventuels arrêtés locaux (municipaux ou préfectoraux), cf. Chapitre 13.1 du volume IV de la présente étude d'impact. Le code de la santé publique recommande que les travaux ne portent pas atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé des riverains.

Les incidences potentielles des émissions de bruit sur la santé humaine sont notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 1.2.1 du présent volume de l'étude d'impact).

1.1.2 Les sources d'émissions de vibrations et leurs incidences potentielles

Les principales sources de vibrations liées au projet global Cigéo sont liées au trafic (routier, ferroviaire) et aux travaux (engins de chantier pour les opérations de terrassement et de construction, tirs à l'explosif pour 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.

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 peuvent avoir des effets sur les personnes exposées (gêne, inconfort, troubles du sommeil, stress...) et, si elles sont très importantes, causer des dommages aux structures des bâtiments.

Il n'existe, à ce jour, aucune réglementation spécifique encadrant les vibrations produites par les activités du projet global Cigéo. Un seuil de perception des vibrations est fixé à 0,10 mm/s dans la norme ISO 2631-2 (6).

Les vibrations liées à l'utilisation d'engins de chantier et aux tirs de mines sont perceptibles pour les bâtiments les plus proches de la zone descendrière (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. Des structures bâties sont présentes à moins de 100 m de voie et sont donc susceptibles de percevoir des vibrations. Elles seront listées dans les études d'impact ultérieures.

Les incidences potentielles des émissions de vibrations sur la santé humaine sont notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 1.2.2 du présent volume de l'étude d'impact).

1.1.3 Les sources d'émissions lumineuses et leurs incidences potentielles

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. Elle peut toutefois devenir dérangeante quand on ne l'attend ou ne la souhaite pas.

Le projet global Cigéo se situe dans une zone globalement peu touchée par la pollution lumineuse.

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 flashes de sécurité rouge en haut des pylônes des éoliennes à proximité de l'aire d'étude immédiate sont également visibles.

Les principales sources lumineuses du projet global Cigéo sont liées à l'éclairage des opérations de chantier pendant les phases d'aménagements préalables et de construction initiale, et des parkings, bâtiments industriels et éclairage de sécurité pendant la phase de fonctionnement pour assurer la sécurité des personnes et des installations.

Pour rappel, la réglementation sur la pollution lumineuse comporte des restrictions sur l'orientation des éclairages extérieurs, sur la couleur des ampoules et sur leur intensité lumineuse ainsi que sur les périodes d'éclairage.

Les incidences potentielles des émissions lumineuses sur la santé humaine sont notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 1.2.3 du présent volume de l'étude d'impact).

1.1.4 Les sources d'émissions d'odeurs et leurs incidences potentielles

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 difficiles à caractériser de manière précise, mais il convient de noter que les nuisances olfactives sont rarement associées à des notions de toxicité. Les odeurs sont en effet le plus souvent perçues à des concentrations très faibles, bien inférieures aux valeurs limites reconnues comme pouvant porter atteinte à la santé.

Le territoire de l'aire d'étude immédiate du projet global Cigéo est principalement composé de parcelles agricoles, l'ambiance olfactive est donc rurale.

Les sources d'émissions d'odeurs du projet global Cigéo sont également les gaz d'échappement liés au trafic sur les routes et voies ferrées créées ou aménagées, 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 restaurants (aération et déchets putrescibles) et de stockages temporaires des eaux, de produits chimiques ou encore de carburants.

La réglementation sur les émissions d'odeurs préconise la mise en place de dispositions de limitation des odeurs, et dans la mesure du possible leur captage à la source (7).

Les incidences potentielles des émissions d'odeurs sur la santé humaine sont notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 1.2.4 du présent volume de l'étude d'impact).

1.1.5 Les sources d'émissions électromagnétiques et leurs incidences potentielles

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).

» DÉFINITION DES CHAMPS (OU ONDES) ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les champs électriques et magnétiques se manifestent par l'action des forces électriques.

Ils sont présents partout dans l'environnement, bien que non perceptibles à l'œil humain. Les champs électromagnétiques peuvent être d'origine naturelle. On peut citer par exemple les champs électromagnétiques générés par la charge électrique de la foudre ou le champ électromagnétique terrestre qui permet l'orientation de l'aiguille aimantée d'une boussole dans la direction nord-sud. Les activités humaines de la vie quotidienne, telles que les ondes radiophoniques, les communications par téléphonie mobile ou les examens radiographiques, génèrent aussi des champs électromagnétiques

S'il est connu depuis longtemps que les champs électriques et magnétiques se composent pour former les champs électromagnétiques (CEM), cela est surtout vrai pour les hautes fréquences (> à 3 MHz). Pour les installations de basse fréquence (entre 30 Hz et 3 MHz), les deux composantes peuvent exister indépendamment. Dans ce cas :

- le champ électrique (CE 50) est un champ de force invisible créé par l'attraction et la répulsion de charges électriques. Il se mesure en Volts par mètre (V/m) ;
- le champ magnétique (CM 50) est un champ de force, généralement créé par des aimants, les pôles terrestres, mais aussi par des courants électriques. L'intensité du champ diminue avec l'augmentation de la distance à sa source. Le champ magnétique est mesuré en Tesla (T).

Les sources possibles de champs électriques et magnétiques sont de deux types :

- **les sources naturelles** : celles-ci 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 (cf. Figure 1-2). Ce sont principalement des champs à 50 Hz.

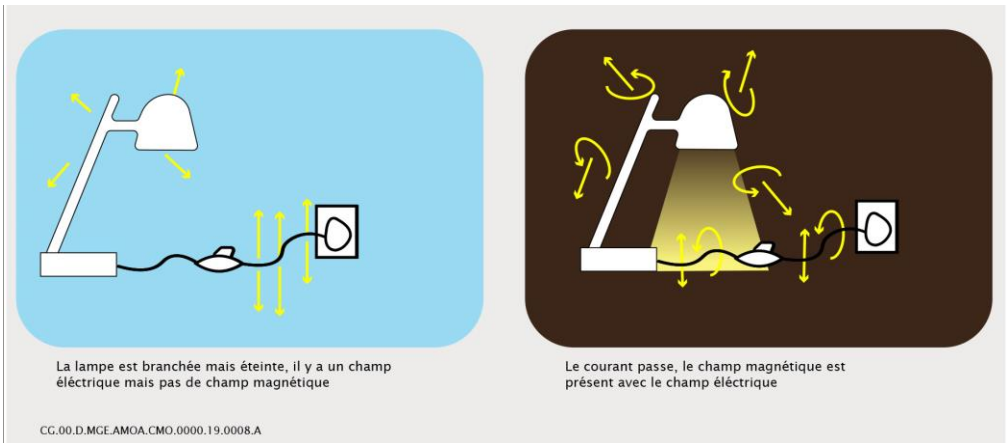


Figure 1-2 Schématisation des champs électriques et magnétiques

³ Source : <http://www.clefschamps.info/>

Les valeurs des champs électriques et magnétiques à 50 Hz produits par quelques appareils ménagers ou installations électriques³ sont présentées à titre illustratif sur la figure 1-3. Pour tous les appareils domestiques les valeurs indiquées sont celles relevées à 30 cm de l'appareil, à l'exception du rasoir électrique dont l'utilisation implique un contact direct avec la tête. Ces valeurs sont indicatives et, entre deux appareils de même usage, des différences peuvent être relevées en fonction des technologies utilisées (type de moteur, fonctionnement sur batterie ou sur secteur, etc.).

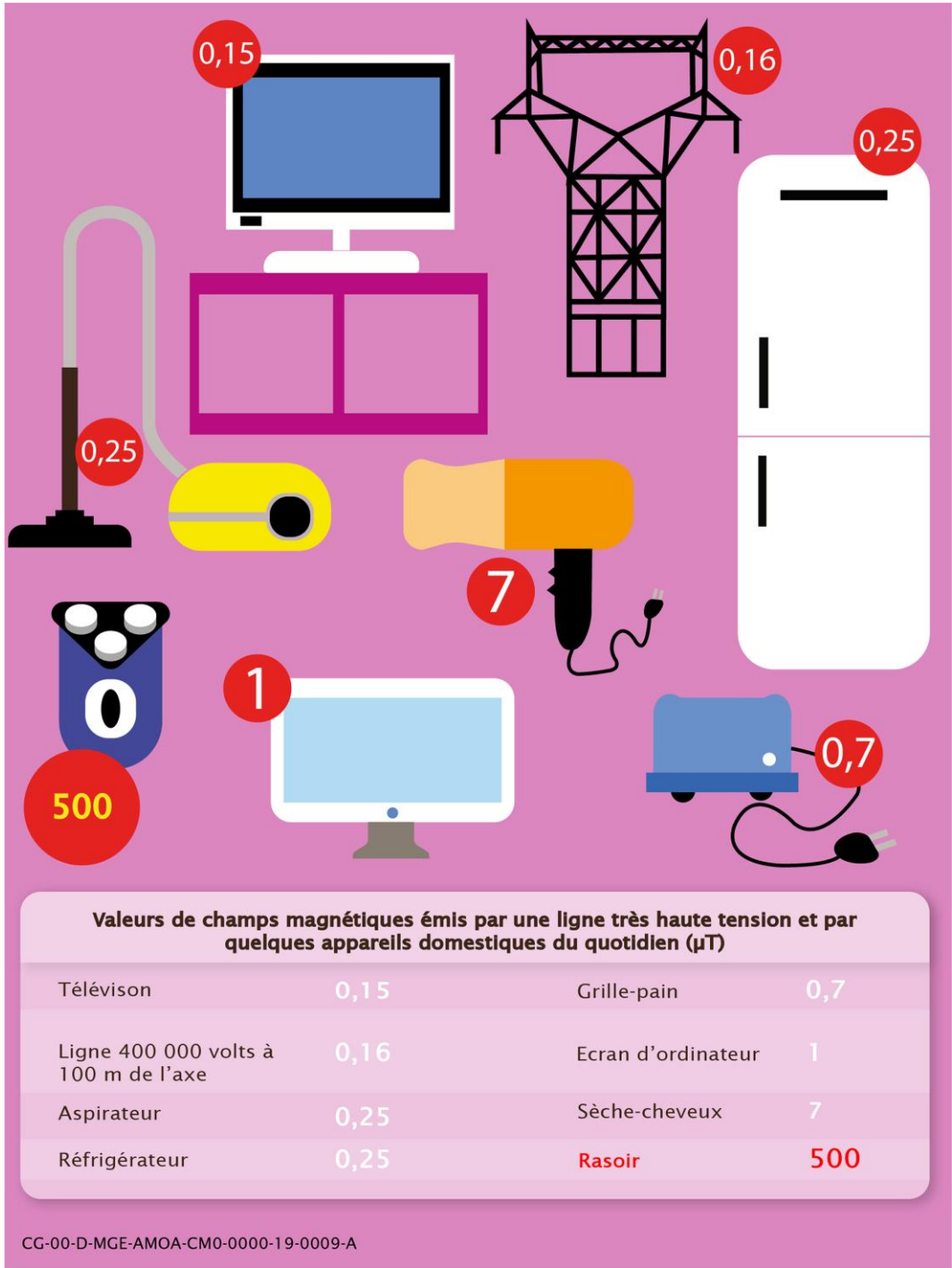


Figure 1-3 Illustration de valeurs des champs électriques et magnétiques émis par des appareils et installations de la vie quotidienne

Des sources d'émissions électromagnétiques sont déjà présentes dans l'aire d'étude immédiate du projet global. Il s'agit de la ligne électrique très haute tension 400 kV d'Houdreville/Méry, de lignes électriques secondaires et de postes de transformation.

1.1.5.1 Les émissions électromagnétiques du projet global

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.

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 1-4, sont notamment :

- 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 se raccordant à la ligne très haute tension existante, sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- le poste de transformation 400/90 kV, sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- les liaisons souterraines 90 kV, sous maîtrise d'ouvrage RTE ;
- les postes de livraison 90 kV sur l'emprise des zones descendrière 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.

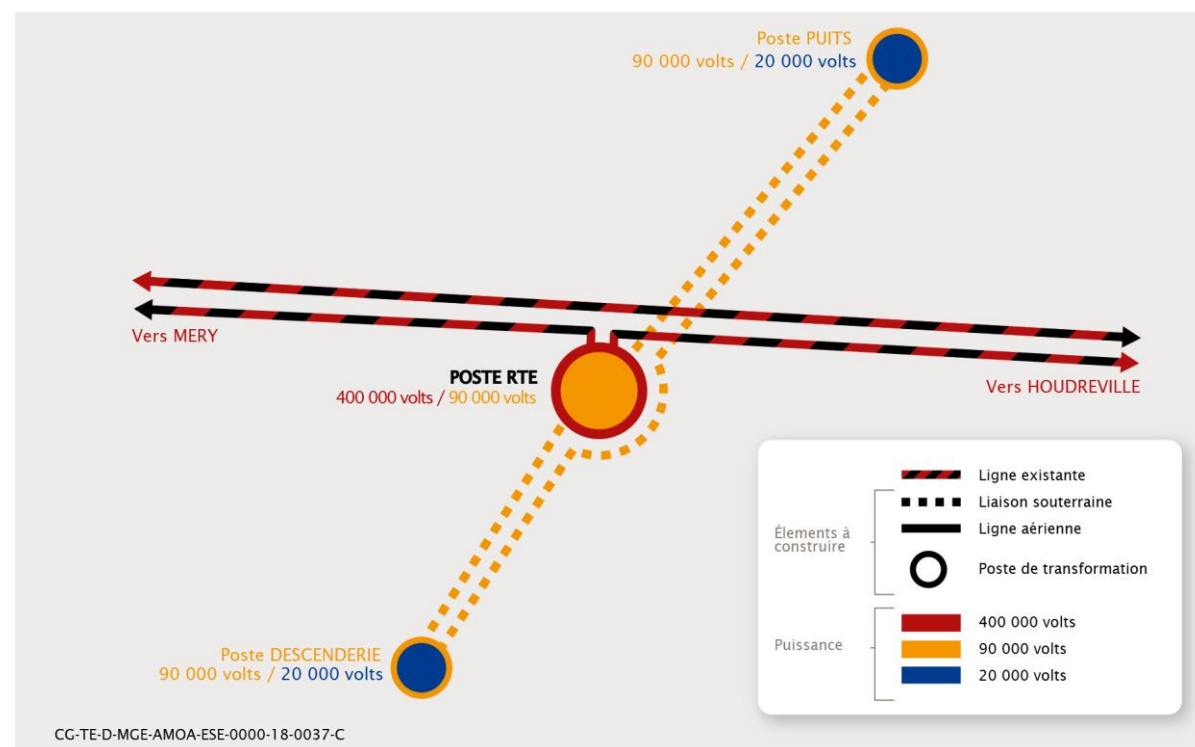


Figure 1-4 Illustration des opérations de raccordement sur la ligne électrique 400 kV⁴

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 magnétiques.

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'entraînent donc pas d'émissions électromagnétiques supplémentaires par rapport à la ligne actuelle.

1.1.5.2 Les incidences potentielles des émissions électromagnétiques sur la santé humaine

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.

a) 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 (8), conclut que « toutes les tentatives de réplification 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.

b) 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 événements.

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 publiée en 2005 (9) et couvrant les cas de leucémie infantile identifiés entre 1962 et 1995 avait observé un excès significatif de leucémies jusqu'à 200 m des lignes à haute tension. Publiée 9 ans plus tard, basée sur les mêmes données, mais étendue jusqu'à l'année 2008, l'étude Bunch (10) n'observe plus de risque, quelle que soit la distance aux lignes. Une étude danoise publiée en 2015 (11) a confirmé cette tendance.

c) Les expertises collectives internationales

Face à 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).

⁴ Source RTE

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 (12) 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 (13). 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 (5), qui reprend, dans son article 12 bis, ces mêmes valeurs limites afin de préserver la santé des populations.

Les incidences potentielles des émissions électromagnétiques sur la santé humaine sont notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 1.2.5 du présent volume de l'étude d'impact).

1.2 Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions physiques

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions physiques est présenté dans le chapitre 13 du volume IV de la présente étude d'impact.

1.2.1 Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions de bruit

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions de bruit, ainsi que leur suivi sont restitués dans le chapitre 13.1.7 du volume IV de la présente étude d'impact.

1.2.1.1 Les mesures d'évitement

La zone puits et la liaison intersites (LIS) sont implantées à plus de 500 m des habitations.

Les trains d'acheminement du fret et des colis de déchets ne circulent qu'en journée (évitement temporel) sur l'installation terminale embranchée et sur la ligne ferroviaire 027000.

1.2.1.2 Les mesures de réduction

Afin de réduire l'impact sonore du projet global au niveau des habitations les plus proches, les mesures de réduction mises en place sont les suivantes :

- aucuns travaux d'aménagements préalables et de construction initiale en surface n'est effectué la nuit (entre 22 h et 7 h) ;
- les camions et engins de chantier sont équipés d'avertisseurs de type « cri du Lynx », permettant de réduire de façon efficace la pollution sonore générée par l'emploi d'un avertisseur de recul et de ne diffuser le signal de recul que dans la zone de danger et l'axe de celle-ci. Ainsi, le signal n'est pas ou peu audible tant à l'avant que sur les côtés de l'engin équipé ;
- un convoyeur à bande transporteuse semi-enterré (cf. Figure 1-5) est mis en place pour l'acheminement des matériaux entre la zone descenderie et la zone puits ;
- des merlons et des écrans acoustiques sont implantés en limite de la zone descenderie, afin de protéger les habitations et établissements recevant du public à proximité (notamment l'habitat de Saudron et l'hôtel du Bindeuil) des émissions de bruit liés aux travaux de construction puis au fonctionnement des installations ;
- la réutilisation de l'emprise des infrastructures existantes, pour la ligne ferroviaire 027000 et l'installation terminale embranchée afin d'éviter des travaux de terrassement ;
- les transformateurs électriques du poste de transformation 400/90 kV sont équipés de murs pare-son pour réduire les émissions de bruit liées à leur fonctionnement.



Figure 1-5 Exemple de convoyeur à bande en caisson béton

1.2.2 Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions de vibrations

La circulation des trains d'acheminement du fret et des colis de déchets en journée uniquement sur l'installation terminale embranchée et sur la ligne ferroviaire 027000 permet d'éviter temporellement les vibrations associées.

Les mesures mises en place pour réduire les émissions de vibrations à proximité des installations et ouvrages du projet global Cigéo sont les suivantes :

- aucuns travaux d'aménagements préalables et de construction initiale n'est effectué la nuit (entre 22 h et 7 h) ;
- les routes sont maintenues en bon état, les engins de chantier font l'objet d'une maintenance régulière et leur vitesse est limitée à 20 km/h sur les zones de travaux ;
- les voies ferrées sont régulièrement entretenues, et équipées si besoin de semelles résilientes. La circulation des trains est limitée à 30 km/h sur l'installation terminale embranchée et 40 km/h sur la ligne ferroviaire 027000 ;
- la zone puits est implantée à l'écart des habitations et les tirs d'explosifs pour le creusement des puits sont effectués en profondeur. Ils sont préparés pour en limiter au maximum les vibrations, et notamment respecter le seuil réglementaire de 10 mm/s, fixé par l'arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières (14).

1.2.3 Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions lumineuses

L'éclairage du projet global Cigéo est adapté en puissance et en durée au plus juste besoin afin d'éviter et de réduire les incidences des halos de lumières, et également de limiter la consommation énergétique, à savoir :

- une mesure d'évitement : les infrastructures de transport (installation terminale embranchée, ligne ferroviaire 027000, déviation de la route départementale D60/960, liaison intersites) ne sont pas pourvues d'éclairage ;
- des mesures de réduction :
 - ✓ aucuns travaux d'aménagements préalables et de construction initiale en surface n'est effectué la nuit (entre 22 h et 7 h) ;
 - ✓ pour les zones du centre de stockage Cigéo nécessitant un éclairage, le nombre de points d'éclairage (organisation en quinconce des lampadaires le long des voies, espacement entre les luminaires...), la durée de l'éclairage (minuteries, variateurs, détecteurs de présence...) et la nature de l'éclairage (intensité, orientation du flux lumineux) sont optimisés.

1.2.4 Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions d'odeurs

Les mesures d'évitement et de limitation des émissions d'odeurs du projet global Cigéo sont classiques, à savoir :

- une mesure d'évitement : les produits chimiques et les carburants du centre de stockage et du poste de transformation 400/90 kV sont stockés dans des ouvrages fermés (locaux, cuves, réservoirs) ;
- des mesures de réduction :
 - ✓ les restaurants du centre de stockage Cigéo sont équipés de systèmes de ventilation et de filtration. Les déchets de restauration putrescibles sont évacués régulièrement ;
 - ✓ pour toutes les opérations, les regards des réseaux d'eaux usées sont équipés de tampons pour empêcher les émanations de mauvaises odeurs. Les bassins de gestion des eaux sont conçus et exploités pour limiter au maximum la stagnation d'eau.

1.2.5 Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions électromagnétiques

1.2.5.1 La mesure d'évitement

Les nouveaux ouvrages électriques (lignes aériennes, postes de transformation, postes de livraison, lignes enterrées) sont implantés à l'écart des habitations (cf. Chapitres 2.8.1 et 4.4.1 du volume II de la présente étude d'impact).

1.2.5.2 Les mesures de réduction

Ils sont conçus et exploités conformément aux prescriptions de l'arrêté du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique (5), qui reprend en droit français les limites issues de la recommandation européenne du 12 juillet 1999 (13) et qui vise entre autres, à limiter l'exposition des tiers aux champs électromagnétiques.

La présence d'un écran métallique coaxial extérieur relié à la terre sur les liaisons souterraines 90 kV permet de réduire significativement l'émission du champ électrique.

Des mesures de suivi (mesures directes et indépendantes des champs électriques et magnétiques) sont prévues dans le cadre d'un plan de contrôle et de surveillance pour vérifier que les valeurs limites d'émission sont respectées dans toutes les zones susceptibles d'exposer de façon continue des personnes à un champ électromagnétique.

1.3 Incidences résiduelles liées aux émissions physiques sur la santé humaine

Les émissions physiques du projet global Cigéo, telles que le bruit, les vibrations, les émissions lumineuses, d'odeurs et électromagnétiques, 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.

Les lieux de vie présents à proximité du projet global Cigéo sont principalement des Établissements Recevant du Public (ERP) et des habitations, fermes isolées ou villages, situés dans les aires d'étude immédiate (cf. Figure 1-6 et Figure 1-7).

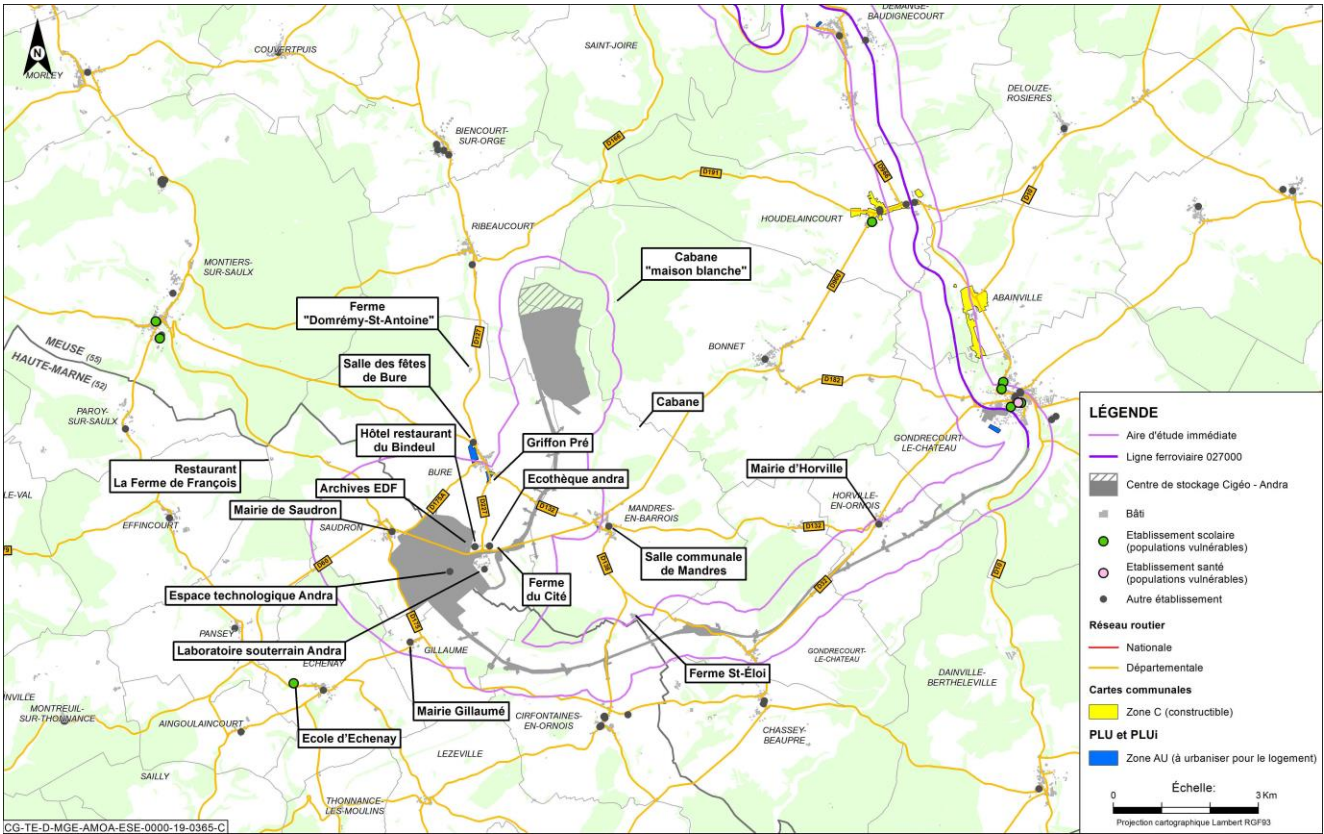


Figure 1-6 Population présente dans la partie sud de l'aire d'étude immédiate

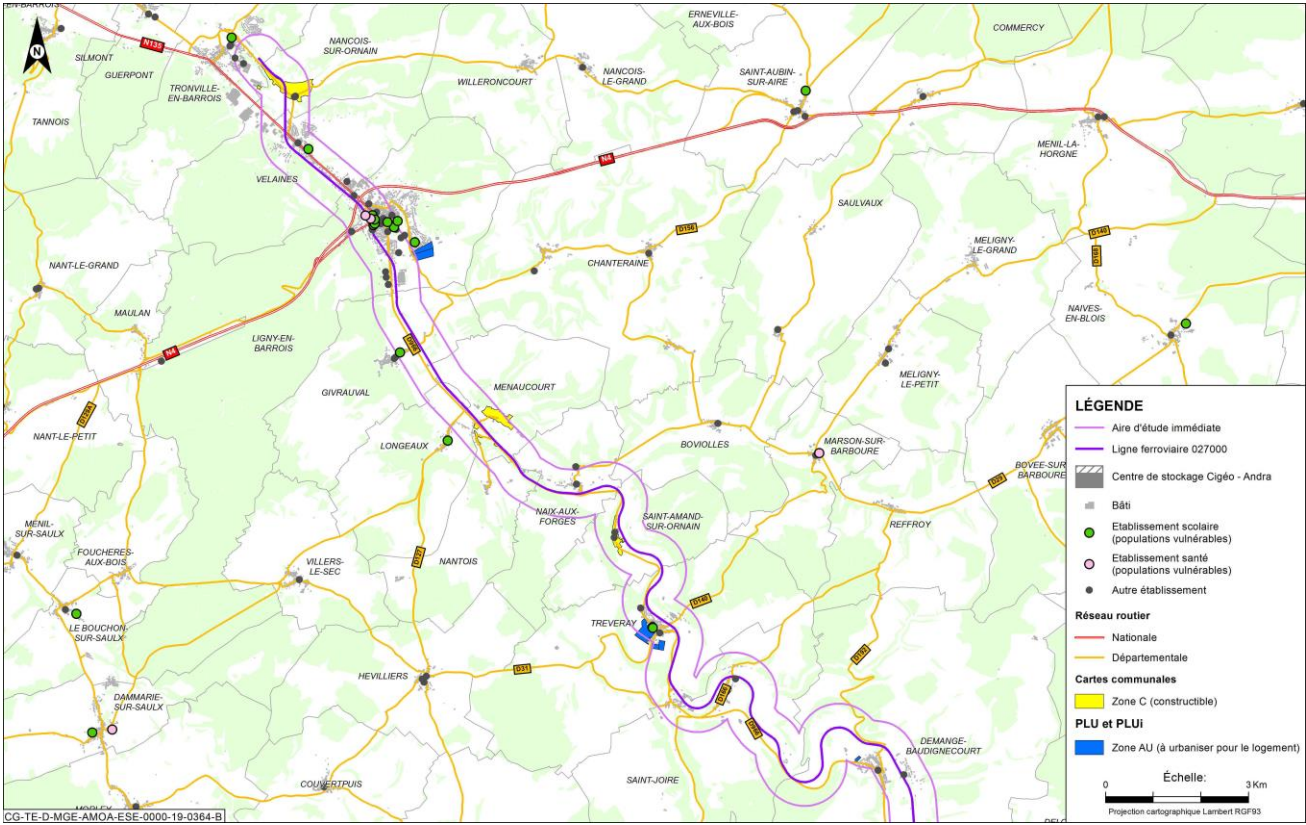


Figure 1-7 Population présente dans la partie nord de l'aire d'étude immédiate

1.3.1 Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions de bruit

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

En synthèse, les incidences résiduelles du projet global sont faibles à modérées selon les zones en phase d'aménagements préalables et de construction initiale et faibles en phase de fonctionnement. Elles sont diurnes, les travaux en surface et les transports n'étant pas réalisés de nuit (sauf cas exceptionnel de transport de colis de déchets radioactifs).

Les niveaux sonores résiduels les plus importants sont situés à proximité des installations du centre de stockage Cigéo (zone descenderie, zone puits, liaison intersites et voies d'accès) en raison de la durée et de l'importance des travaux qui y sont réalisés. L'exposition maximale des populations autour du centre de stockage Cigéo est variable selon les phases et diminue sensiblement dès lors que l'on s'éloigne des sites :

- en phase d'aménagements préalables et de construction initiale, les riverains à proximité des installations et infrastructures en travaux pourraient être concernés par des niveaux sonores ambiants modérés, pouvant atteindre au maximum en journée de l'ordre de 50 dB(A) au niveau de Saurdon, 45 dB(A) au niveau de Gillaumé et 40 dB(A) au niveau de Bure (niveaux « assez calme » et « calme » de l'échelle des niveaux sonores perçus, (cf. Figure 1-1) ;
- en phase de fonctionnement, les niveaux sonores sont du même ordre de grandeur que pendant la phase de construction initiale.

Ces niveaux sonores peuvent représenter une gêne et éventuellement un peu de stress pour les résidents à proximité des travaux en journée, mais en l'absence de travaux et de circulation pendant la nuit, ils ne perturberont pas leur sommeil.

Les mesures de réduction associées au bruit, présentées au chapitre 1.2.1 du présent volume de l'étude d'impact, sont mises en œuvre dès la phase d'aménagements préalables afin de réduire les nuisances sonores associées aux travaux au plus tôt et sont maintenues pendant la phase de fonctionnement.

Les niveaux sonores pour les phases d'aménagements préalables, de construction initiale et de fonctionnement ne reflètent pas encore les niveaux résiduels qui pourront être atteints, notamment compte tenu du fait que les modélisations ne tiennent pas encore compte de l'ensemble des mesures d'évitement et de réduction, notamment du transport de matériaux par camion sur la liaison intersites grâce au convoyeur à bande transporteuse de la liaison intersites. La modélisation sera mise à jour et les niveaux sonores résiduels (inférieurs) seront précisés lors de l'actualisation ultérieure de l'étude d'impact.

Les incidences résiduelles liées aux autres opérations (installation terminale embranchée, alimentation électrique, adduction d'eau, mise à niveau de la ligne ferroviaire et la déviation de la route départementale D60/960) sont essentiellement dues à la construction des infrastructures et des ouvrages, (avec des niveaux comparables, voire plus faibles, que ceux associés aux travaux d'aménagements préalables du centre de stockage Cigéo).

Les incidences résiduelles pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage sont principalement liées au fonctionnement d'installations de surface, au trafic routier et au trafic ferroviaire dans une moindre mesure (8 passages de train maximum par jour, cf. Chapitre 12.1 du volume IV de la présente étude d'impact). Ces niveaux résiduels respectent les dernières recommandations des experts de l'Organisation mondiale de la santé (inférieur à 53 décibels (dB(A)) en journée et à 45 dB(A) la nuit pour le trafic automobile, et inférieur à 55 décibels (dB(A)) en journée et à 44 dB(A) la nuit pour le trafic ferroviaire, cf. Chapitre 1.1.1.2 du présent volume de l'étude d'impact).

Après la mise en œuvre des mesures de réduction, l'ensemble des travaux est à l'origine d'émissions de bruits classiques pour un chantier, conformes aux différentes réglementations. Les niveaux sonores, en phase d'aménagements préalables et de construction initiale, sont au maximum de l'ordre de 50 dB(A) au niveau de Saudron, 45 dB(A) au niveau de Gillaumé et 40 dB(A) au niveau de Bure.

Bien que l'ambiance sonore reste globalement calme, une augmentation du niveau sonore est perceptible. Elle peut être potentiellement et ponctuellement source de stress pour les résidents à proximité des travaux, notamment le long des infrastructures de transport et à proximité la zone descendrière du centre de stockage.

Les émissions de bruit résiduelles du projet global Cigéo sont modérées à faibles en fonction des phases, mais l'ambiance sonore reste modérée (très calme à assez calme). En l'absence de travaux en surface et de circulation pendant la nuit, le sommeil des résidents n'est pas perturbé.

Les incidences résiduelles des émissions de bruit du projet global Cigéo sur la santé humaine sont faibles

1.3.2 Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions de vibrations

L'évaluation des incidences liées aux émissions de vibrations 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.

Les vibrations liées à la circulation des engins et des poids lourds sur les voies, et des trains sur l'installation terminale embranchée (ITE) ainsi que celles générées par l'utilisation d'engins de chantier et d'équipements sont très peu perceptibles en dehors des zones d'intervention potentielles du projet Cigéo.

En zones puits et descendrière, les compacteurs (rouleaux compresseurs) mis en œuvre lors du remblaiement des terres et de la gestion des versées afin de tasser, compacter et lisser les sols sont les engins créant le plus de vibrations dans la catégorie des sources de vibrations continues.

En considérant le seuil de perception de 0,10 mm/s, la distance de maximale de perception des vibrations associées à l'utilisation des compacteurs est de 40 m. Les vibrations engendrées par les compacteurs peuvent

ainsi être ressenties au maximum dans un rayon de 40 m, notamment dans les installations suivantes : l'hôtel du Bindeuil, les archives EDF, la Ferme du Cité, les bâtiments de l'Andra : l'Espace Technologique, l'Écothèque, le laboratoire souterrain et son bâtiment d'accueil du public.

Les travaux n'étant pas réalisés la nuit, le sommeil des résidents à proximité n'est pas troublé.

Sur l'installation terminale embranchée (ITE), jusqu'à une distance de 100 m de la voie, le niveau de vibrations dépasse le seuil de perception des personnes de 0,10 mm/s. Au-delà de 100 m, ces vibrations ne sont plus perceptibles par les personnes. Deux habitations à Gondrecourt-le-Château sont présentes à moins de 100 m de l'ITE.

Concernant la ligne 027000 les études vibratoires n'ont pas encore été réalisées. Des structures bâties sont présentes à moins de 100 m de la voie et sont donc susceptibles de percevoir des vibrations. Elles seront listées dans les études d'impact ultérieures. Aucune incidence sur les structures n'est envisagée.

Les vibrations liées aux travaux en souterrain ne sont pas perceptibles en surface. Seuls, les tirs d'explosifs pour le creusement des puits peuvent être perceptibles jusqu'à 1 km mais restent très ponctuels. Les vibrations engendrées par les tirs de creusements des puits ne sont pas perceptibles par les riverains de la zone puits. Seules les vibrations engendrées par les tirs de creusements des descendrières peuvent être perceptibles au-delà des limites de propriétés du centre de stockage Cigéo. Les vibrations associées à ces tirs peuvent être ressenties sur les lieux d'activité à proximité (archives EDF, hôtel du Bindeuil, Espace Technologique, Écothèque, Laboratoire souterrain et son bâtiment d'accueil du public de l'Andra). Les tirs ne sont effectués qu'en journée, ils ne sont pas susceptibles de troubler le sommeil des résidents de l'hôtel du Bindeuil. Par ailleurs, ils ne peuvent pas être ressentis au niveau des habitations des bourgs de l'aire d'étude rapprochée du milieu physique (à distance supérieure au kilomètre). Enfin, les établissements et les riverains seront informés des périodes de tirs d'explosifs.

Les incidences résiduelles liées aux vibrations du projet global Cigéo sont faibles à proximité. Certaines vibrations peuvent être perceptibles au niveau de quelques lieux de vie, mais restent en deçà du seuil de perception au niveau des habitations. Les activités sources de vibration sont ponctuelles et ne sont réalisées qu'en journée. Elles ne sont pas susceptibles de perturber le sommeil des résidents.

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

1.3.3 Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions lumineuses

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

Les incidences résiduelles sont essentiellement liées aux chantiers (zones puits et descendrière, zones concernées par les travaux de raccordements ferroviaire en particulier pour la réalisation de l'ITE, électriques, routiers...) qui auront lieu en journée mais pourront lors des périodes d'hiver en particulier, nécessiter un éclairage en début ou fin de journée. Ces dispositifs d'éclairage permettent de diriger la lumière là où elle est requise et d'en adapter les puissances et les durées. Certains secteurs en chantier pourraient devoir être éclairés toute la nuit, pour des raisons de sécurité et de protection.

Les incidences résiduelles liées aux émissions lumineuses sont faibles au niveau des habitations compte tenu des distances avec les sites d'implantation du centre de stockage Cigéo (zones puits et descendrière) et du caractère temporaire et irrégulier des éclairages sur les chantiers linéaires des autres opérations du projet global.

Les éclairages nécessaires à la sécurité du centre de stockage et des chantiers linéaires sont adaptés en puissance et en durée au plus juste besoin. Le flux lumineux est orienté (corps lumineux fermés et focalisés) sur la(es) zone(s) à éclairer uniquement.

Le nombre de points d'éclairage est très limité et les flux lumineux ne sont pas orientés vers les zones de résidence.

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

1.3.4 Les incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions d'odeurs

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

Les incidences résiduelles liées aux émissions d'odeurs du projet global Cigéo sont liées aux gaz d'échappement des moteurs thermiques et aux enrobés routiers mis en place sur les routes. Les nuisances associées sont peu intenses, très localisées, de courte durée (mise en place de revêtements bitumineux) et la dilution des gaz d'échappement dans l'atmosphère est rapide.

Les ouvrages et bâtiment du centre de stockage Cigéo et des postes de transformation sont conçus et entretenus de manière à ce que les éléments qu'ils contiennent ne soient pas à l'origine de nuisances olfactives.

Ces émissions d'odeurs résiduelles du projet global Cigéo sont très faibles et ponctuelles.

Les incidences résiduelles des émissions d'odeurs du projet global sur la santé humaine sont très faibles

1.3.5 Les incidences résiduelles liées aux émissions électromagnétiques

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.

Compte tenu de la profondeur de 500 m 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.

1.3.5.1 Les champs électriques et magnétiques 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 (CM₅₀) et champs électriques (CE₅₀) 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 1-1.

Tableau 1-1

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 (13)	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 (5), cf. Chapitre 1.1.5 du présent volume de l'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

1.3.5.2 Les champs électriques et magnétiques 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 (CM₅₀) 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 1-2. Conformément aux normes de mesures CEI 61786 (15), CEI 62110 (16) et UTE C99 132 (17), les valeurs de champs magnétiques sont calculées à un mètre du sol.

Tableau 1-2

Valeurs moyennes et maximales des champs magnétiques pour une tension de 90 kV, comparées à la limite réglementaire

	Type de pose	Champs magnétiques (en μT)				
		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 (13)	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.

1.3.5.3 Les champs électriques et magnétiques 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 potentielles 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.

En conclusion, les incidences résiduelles liées aux émissions électromagnétiques du projet global Cigéo sont très faibles à proximité, et inférieures aux limites réglementaires. De plus, 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 des émissions électromagnétiques du projet global Cigéo sur la santé humaine sont très faibles

1.4 Synthèse des incidences liées aux émissions physiques sur la santé humaine

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions physiques, à savoir de bruit, de vibrations, de lumière, d'odeurs et de champs électromagnétiques.

L'évaluation des effets sur la santé se base sur l'analyse des résultats d'études scientifiques ayant conduit à des recommandations d'experts nationaux et internationaux ou à la détermination de seuils de nuisance et/ou de seuils réglementaires pour la protection de la santé des populations.

Les émissions physiques ont des incidences potentielles notables et font l'objet de mesures d'évitement et de réduction. Il est à noter toutefois que ces émissions se propageant dans l'air et/ou le sol, elles diminuent significativement avec la distance d'éloignement.

Les émissions de bruit

Les principales sources de bruit sont associées aux chantiers des phases d'aménagements préalables et de construction initiale, ainsi qu'au trafic routier engendré par le projet global Cigéo dans toutes ses phases de vie.

Les nuisances les plus importantes sont engendrées par les chantiers sur les zones puits et descenderie du centre de stockage Cigéo, en raison de la durée (une dizaine d'années) et de l'ampleur des travaux. Cependant, la zone puits étant éloignée des habitations, c'est la zone descenderie qui présente le plus d'incidences potentielles sur les zones habitées à proximité. Il en est de même en phase de fonctionnement.

Des mesures d'évitement et de réduction sont mises en œuvre afin de réduire les niveaux sonores induits par les travaux et le fonctionnement des installations de surface, et notamment ceux perceptibles au niveau des zones habitées. L'ensemble de ces mesures et leur suivi sont restitués au chapitre 13.1 du volume IV de la présente étude d'impact. La zone puits et la liaison intersites (LIS) sont implantées à plus de 500 m des habitations, les trains d'acheminement du fret et des colis de déchets ne circulent qu'en journée (évitement temporel) 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, aucuns travaux en surface n'est réalisé de nuit (entre 22 h et 7 h), des merlons et des écrans acoustiques sont implantés en limite de la zone descenderie et les autres opérations du projet global sont implantés autant que possible à distance des habitations.

Après la mise en œuvre des mesures de réduction, l'ensemble des travaux est à l'origine d'émissions de bruits classiques pour un chantier, conformes aux différentes réglementations. Les niveaux sonores, en phase d'aménagements préalables et de construction initiale, sont au maximum de l'ordre de 50 dB(A) au niveau de Saudron, 45 dB(A) au niveau de Gillaumé et 40 dB(A) au niveau de Bure.

Bien que l'ambiance sonore reste globalement calme, une augmentation du niveau sonore en journée est perceptible. Elle peut être potentiellement et ponctuellement source de gêne pour les résidents à proximité des travaux, notamment le long des infrastructures de transport et à proximité la zone descenderie du centre de stockage. Ces gênes n'ayant pas lieu la nuit, le sommeil des résidents n'est pas perturbé.

Les émissions de bruit du projet global Cigéo ont une incidence faible sur la santé humaine.

Les émissions de vibrations

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 implantations potentielles. Des tirs d'explosifs sont également réalisés pour le creusement des puits sur le centre de stockage en phase travaux.

Les vibrations liées à la circulation des engins et des poids lourds sur les voies, et des trains sur l'installation terminale embranchée (ITE) ainsi que celles générées par l'utilisation d'engins de chantier et d'équipements sont très peu perceptibles en dehors des zones d'intervention potentielles du projet Cigéo. Les vibrations liées aux travaux en souterrain ne sont pas perceptibles en surface. Seuls les tirs d'explosifs peuvent être ressentis jusqu'à 1 km mais restent très ponctuels.

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction des vibrations ainsi que leur suivi sont restitués au chapitre 13.2 du volume IV de la présente étude d'impact. Parmi des mesures, sont notamment prévus la circulation des trains d'acheminement du fret et des colis de déchets en journée uniquement sur l'installation terminale embranchée et sur la ligne ferroviaire 027000, l'interruption pendant la nuit (entre 22 h et 7 h) des travaux de surface et l'éloignement, autant que faire se peut, des zones habitées.

Les vibrations associées aux tirs d'explosif pour le creusement des puits peuvent être ressenties très ponctuellement au niveau des bâtiments d'activité les plus proches (archives EDF, hôtel restaurant 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 km et il n'y aura pas de perception à leur niveau. Les activités sources de vibration étant réalisées en journée, elles ne sont pas susceptibles de perturber le sommeil des résidents.

Les émissions de vibrations du projet global ont une incidence très faible sur la santé humaine.

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, et des postes de garde du centre de stockage Cigéo pendant la phase de fonctionnement pour assurer la sécurité des personnes et des installations.

Des mesures de réduction sont mises en œuvre afin de réduire les émissions lumineuses induites, et notamment celles perceptibles au niveau des zones habitées. L'ensemble de ces mesures et leur suivi sont restitués au chapitre 13.3 du volume IV de la présente étude d'impact. Il est à noter que le nombre de points d'éclairage est très limité (principalement associés à la sécurité du centre de stockage) et les flux lumineux ne sont pas orientés vers les zones de résidence.

Les émissions lumineuses du projet global ont une incidence faible sur la santé humaine.

Les émissions d'odeurs

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 putrescibles des zones de restauration et à la gestion des eaux.

Les mesures d'évitement et de réduction des odeurs ainsi que leur suivi sont restitués au chapitre 13.4 du volume IV de la présente étude d'impact. Il s'agit notamment du stockage des produits et des déchets dans des ouvrages fermés, ventilés et filtrés si nécessaire.

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 dilution dans l'atmosphère est rapide.

Les émissions d'odeurs du projet global ont une incidence très faible sur la santé humaine.

Les émissions électromagnétiques

Les sources d'émissions électromagnétiques sont associées aux ouvrages d'alimentation électrique du projet global, à savoir, deux portions de ligne aérienne 400 kV, deux liaisons souterraines 90 kV,

l'implantations potentielles du 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.

Des mesures d'évitement et de réduction sont mises en œuvre, 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 électromagnétiques (cf. chapitre 13.5 du volume IV de la présente étude d'impact).

Les champs électriques et magnétiques générés par les équipements électriques du projet global Cigéo sont très inférieurs aux limites réglementaires.

Les émissions électromagnétiques du projet global ont une incidence très faible sur la santé humaine.

En conclusion, les émissions physiques engendrées par le projet global Cigéo n'ont pas d'incidences notables sur la santé humaine au regard des niveaux d'exposition, en dehors de la gêne occasionnée par le bruit associé aux travaux, pour quelques lieux de vie à proximité immédiate. Ces travaux ne sont pas réalisés la nuit et ne perturbent donc pas le sommeil des habitants.

2

Évaluation des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine

2.1	Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions chimiques	20
2.2	Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques	25
2.3	Incidences résiduelles liées aux émissions chimiques sur la santé humaine	26
2.4	Synthèse des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine	34

Le projet global Cigéo est à l’origine d’émissions chimiques (poussières, composés organiques volatils…) 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 substances présentant un risque chimique suit les recommandations de l’Institut National de Veille Sanitaire (InVS) (18) et de l’Institut National de l’Environnement Industriel et des Risques (INERIS) (19). L’évaluation est réalisée selon une démarche prudente, avec des choix d’hypothèses majorantes afin de couvrir au maximum les incertitudes associées. La méthodologie associée est présentée en détail dans le chapitre 17.2 du volume VII de la présente étude d’impact. Une étude complémentaire air et santé de type III⁵ conforme à la note du ministère du 22 février 2019 (20) est prévue pour les prochaines actualisations de cette étude d’impact afin de détailler les effets sur la santé liés aux 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 bibliographique. Elle s’appuiera sur les mesures de qualité de l’air présentées au chapitre 2.4 du volume IV de la présente étude.

Après l’identification des substances chimiques émises par le projet et de leurs incidences potentielles, les mesures visant à supprimer et si ce n’est pas possible, à réduire au maximum les incidences liées à l’émission de ces substances chimiques vis-à-vis de la santé humaine sont présentées.

La caractérisation des substances chimiques émises dans l'environnement par voie atmosphérique ou liquide permet ensuite de calculer les concentrations ajoutées dans le milieu récepteur, c'est-à-dire l'atmosphère, le sol ou l'eau. Les expositions humaines résiduelles, par inhalation et/ou ingestion de ces substances, sont évaluées, en prenant en compte les habitudes de vie des populations environnantes.

Enfin, conformément à la méthodologie recommandée par l’INERIS (19), 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). Il est important de noter que cette méthodologie n’est applicable que pour certaines substances chimiques au regard des connaissances scientifiques actuelles. Pour les autres substances chimiques, les résultats de l’évaluation de l’exposition humaine sont comparés aux valeurs réglementaires ou de références disponibles pour déterminer le risque sanitaire.

À titre d’information, la correspondance entre les étapes de la démarche d’évaluation des risques sanitaires de l’INERIS et leur restitution dans la présente étude d’impact est présentée dans le tableau 2-1 ci-dessous.

Tableau 2-1 Correspondances entre les étapes de la démarche d’évaluation des risques sanitaire de l’INERIS et leur restitution dans la présente 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
Identification des dangers	Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions chimiques (chapitre 2.1 du présent volume de l’étude d’impact)
Évaluation des relations dose-réponse	

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
	<i>* L’assimilation de toutes les poussières aux PM_{2,5} ou aux PM₁₀ est un choix majorant en l’absence de données sur la caractérisation des poussières.</i> <i>** Les composés organiques volatils (COV) font partie des hydrocarbures imbrûlés lors de la combustion du carburant. Pour les COV, il est fait le choix de les assimiler à la quantité de benzène contenu dans le carburant utilisé pour les véhicules. Le benzène fait partie de la famille des COV les plus toxiques. D’un point de vue quantitatif, la proportion de benzène retenue représente 5 % de la quantité d’hydrocarbures consommée. Ce choix est majorant par rapport à la réglementation en vigueur qui stipule depuis le 1^{er} janvier 2000 que la teneur en benzène dans les carburants ne doit pas dépasser 1 % (directive n° 98/70/CE du 13 octobre 1998 (22) concernant la qualité de l’essence et des carburants diesel et modifiant la directive 93/12/CEE du Conseil). 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.</i> Les relations dose-réponse (chapitre 2.3.1.4 du présent volume de l’étude d’impact)
Caractérisation des expositions	La démarche d’évaluation de l’exposition humaine liées aux émissions chimiques et L’évaluation de l’exposition humaine liée aux émissions chimiques (chapitres 2.3.2.1 et 2.3.2.2 du présent volume de l’étude d’impact)
Caractérisation des risques sanitaires	L’analyse du risque sanitaire lié (chapitre 2.3.2.3 du présent volume de l’étude d’impact)
Discussion des incertitudes	Analyse de sensibilité de l’évaluation aux incertitudes (chapitre 17.2.3 du volume VII de la présente étude d’impact)
Conclusion de l’évaluation	Synthèse des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine (chapitre 2.4 du présent volume de l’étude d’impact)

2.1 Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions chimiques

Le périmètre d’identification des sources de danger liées aux émissions chimiques a été étendu aux sources d’émissions microbiologiques car les sources d’émission, les modes de dispersion et les mesures d’évitement et de réduction sont communes ou proches.

Les sources d’émissions chimiques peuvent être de deux types : liquides ou atmosphériques.

⁵ Ces études air et santé se répartissent en 4 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 détaille les critères relatifs à chaque catégorie.

2.1.1 Les sources d’émissions chimiques liquides et leurs incidences potentielles

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.

À chaque phase du projet global Cigéo correspondent des quantités et des natures de composés liquides chimiques traités, recyclés ou rejetés à des débits compatibles avec le régime actuel des cours d'eau récepteurs et avec un objectif de respect du bon état chimique et écologique de ces mêmes cours d’eau.

Les caractéristiques et les effets potentiels pour la santé humaine de ces sources d’émissions liquides chimiques sont présentés dans le tableau 2-2 ci-dessous.

Tableau 2-2 Caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques présents dans les émissions liquides 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 utilisé 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.
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. Pour l’homme en bonne santé, 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.

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 (21). Certaines eaux minérales contiennent des teneurs en sulfates largement supérieures à 250 mg/L.

Composés chimiques	Caractéristiques	Effets potentiels sur la santé
Métaux (cuivre, plomb, zinc, cadmium)	Les métaux peuvent être présents sous forme de traces dans les matériaux de construction des ouvrages ou équipements (principalement cuivre, plomb, zinc et cadmium). 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 le système 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 le système 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 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-

Composés chimiques	Caractéristiques	Effets potentiels sur la santé
		vasculaire (hypertension). L'exposition au cadmium par inhalation peut aussi se traduire par un excès de cancers pulmonaire et prostatique.
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.

Composés chimiques	Caractéristiques	Effets potentiels sur la santé
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.

La qualité chimique actuelle des cours d'eau sur l'aire d'étude éloignée (cf. chapitres 5 du volume III de la présente étude d'impact) 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). La qualité écologique des cours d'eau est souvent classée en « état moyen ». Les dégradations observées concernent principalement une altération du bilan en oxygène et de la teneur en nutriments, observation très fréquente pour des cours d'eau subissant des assecs en milieu agricole. Ces dégradations peuvent, pour les petits cours d'eau, aller jusqu'à la classification en « mauvais état ». La composante biologique (microfaune) est quant à elle assez préservée et plutôt équilibrée.

Les eaux superficielles ne servent pas à la production d'eau potable et sont peu utilisées localement. L'aire d'étude éloignée présente des cours d'eau à très faibles débits en interface avec les eaux souterraines (milieu karstique).

La masse d'eau des calcaires du Barrois est globalement de mauvaise qualité avec des déclassements récurrents liés notamment aux matières en suspension et à la turbidité. La masse d'eau de l'Oxfordien calcaire subit également régulièrement des déclassements liés à la turbidité (matières en suspension) et à la présence de sulfates en concentration supérieure à la norme de qualité environnementale. Les aquifères des calcaires du Barrois et du Kimméridgien-Oxfordien sont utilisées pour l'alimentation en eau potable de collectivités, pour des usages agricoles et quelques usages de puits privés (cf. Chapitre 5.2 du volume III de la présente étude d'impact).

2.1.1.1 Les émissions 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 maitres 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 pluviales et les eaux usées.

Les eaux pluviales 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 de traces d'hydrocarbures liées aux travaux d'aménagement des réseaux et des voiries, dont le fonctionnement d'une petite centrale à enrobé mobile ;
- des traces de carburants issues d'une éventuelle pollution chronique ou accidentelle relative à la présence d'engins et de matériels de chantier à moteur thermique, ainsi que de dispositifs de distribution de carburant.

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

2.1.1.2 Les émissions 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 descendrière 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 eaux sont susceptibles de contenir :

- de la matière minérale dans les eaux pluviales liée au ruissellement sur les verses et sur les 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 ou à la petite centrale à enrobé mobile pour les travaux d'imperméabilisation des voiries. Ces traces d'hydrocarbures peuvent se retrouver dans les eaux pluviales 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 (nickel, plomb, zinc...) issus des eaux pluviales ruisselant sur les verses au droit de la zone puits du centre de stockage Cigéo ;
- des traces d'hydrocarbures, de matière inerte en suspension et de métaux lourds contenues dans les eaux pluviales ruisselant sur les infrastructures de transport en exploitation (circulation des 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).

2.1.1.3 Les émissions chimiques liquides en phase de fonctionnement

En phase de fonctionnement, il n'y a plus de centrale à enrobé mobile et le volume des travaux est beaucoup plus faible car il est uniquement lié à l'extension progressive des ouvrages souterrains. 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 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...).

Ainsi, les sources d'émissions 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 notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 2.2.1 du présent volume de l'étude d'impact).

2.1.2 Les sources d'émissions chimiques atmosphériques et leurs incidences potentielles

Les 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.

2.1.2.1 Les émissions chimiques atmosphériques en phase d'aménagements préalables et de construction initiale

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

La majorité de ces émissions sont produites à la fois dans la phase d'aménagements préalables et dans la phase de construction initiale. Il s'agit de poussières, d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures (dont des composés organiques volatils).

Seules les émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et de métaux issues de la petite centrale à enrobé mobile pour l'imperméabilisation des voiries ne concernent que la phase d'aménagements préalables.

2.1.2.2 Les émissions chimiques atmosphériques en phase de fonctionnement

Les sources d'émissions atmosphériques chimiques des installations du centre de stockage Cigéo pendant la phase 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 ;
- 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, de gaz de combustion (composés organiques volatils) 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 et des gaz de combustion.

Pour les opérations des autres maîtres d'ouvrage, les principales sources d'émissions atmosphériques chimiques sont celles liées aux véhicules de transports (matériaux, de colis de déchets radioactifs) nécessaires 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. Elles sont constituées de composés chimiques produits par certains ouvrages électriques, tels que l'hexafluorure de soufre ou l'ozone, et d'agents microbiologiques (légionnelles) susceptibles de se développer dans les dispositifs de refroidissement.

2.1.2.3 Les incidences potentielles des émissions chimiques sur la santé humaine

Les effets potentiels pour la santé humaine des sources d'émissions atmosphériques chimiques du projet global Cigéo sont présentés dans le tableau 2-3 ci-dessous.

Tableau 2-3 *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, hormis le méthane, 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 (NO ₂).	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 hyper activité 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 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 entraîne 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.

⁷ Centre International de recherche sur le Cancer (CIRC)

Composés chimiques	Caractéristiques	Effets potentiels sur la santé
Les 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.
Les 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 la petite centrale à enrobé mobile pour l'imperméabilisation des voiries en phase d'aménagements préalables.	Plusieurs Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) sont considérés comme cancérogènes avérés (groupe 1A du CIRC ⁷ 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).
Métaux (cuivre, Plomb, zinc, cadmium)	Les métaux émis par voie atmosphérique peuvent être produits par la petite centrale à enrobé mobile en phase d'aménagements préalables.	Les effets potentiels des métaux sont présentés dans le tableau 2-3.
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 : • bénigne. Il s'agit d'un état grippal avec une guérison spontanée au bout de 5 jours environ ; • grave, dite « légionellose ». Il s'agit d'une infection pulmonaire aiguë qui peut entraîner un décès dans 10 % à 15 % des cas (individus fragiles).

Il est à noter que l'aire d'étude rapprochée du milieu physique (incluant les lieux de vie à proximité du projet) est rurale, et 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, PM₁₀ 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 réglementation à l'exception de l'ozone et des particules 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. Quant aux pics de PM_{2,5}, mesurés ils sont liés à l'activité agricole (labourage, moisson...).

Les incidences potentielles des émissions chimiques atmosphériques sur la santé humaine sont notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 2.2.2 du présent volume de l'étude d'impact).

2.2 Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques

2.2.1 Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques liquides

2.2.1.1 Les mesures d'évitement et réduction liées à la gestion des eaux

La conception des dispositifs de gestion des eaux et la stratégie associée, notamment le recyclage de certaines eaux et les différentes filières de traitement mises en place, tels que présentés dans le chapitre 5.3 du volume IV de la présente étude d'impact, permettent d'éviter, le cas échéant, de réduire les sources d'émissions chimiques et biologiques associées aux rejets liquides.

Il est à noter en particulier que chaque type d'eaux (pluviales des zones puits et descenderie, du poste de transformation 400/90 kV et le long des infrastructures de transport, de ruissellement sur les verses, usées et de fond du centre de stockage Cigéo) fait l'objet d'une collecte et d'un traitement adapté. Les eaux pluviales sont gérées séparément des autres types d'eaux, lorsque celles-ci ne sont pas recyclées, avant rejet.

Ces mesures permettent d'obtenir des eaux rejetées de bonne qualité chimique et écologique avec des paramètres contrôlés inférieurs aux valeurs de référence fixées par la directive cadre sur l'eau et assurent ainsi la bonne qualité des eaux rejetées. Ces eaux de bonne qualité rejetées dans le milieu récepteur naturel sont ensuite soit diluées dans un cours d'eau, soit filtrées par le sol.

Des modalités de suivi des eaux sont mises en place, en particulier au droit des captages des nappes d'eaux souterraines permettant l'alimentation en eau potable des populations. Elles permettent de vérifier que les concentrations en substances chimiques et biologiques sont bien inférieures aux valeurs de référence assurant la bonne qualité des eaux, et de déclencher le cas échéant, des mesures de compensation d'usage (en cas de pollution accidentelle, l'utilisation du captage pour l'alimentation en eau potable pourrait être arrêtée temporairement sur décision préfectorale, le temps de mener les analyses nécessaires, et une distribution d'eau de remplacement serait effectuée).

2.2.1.2 Les autres mesures d'évitement et de réduction

Les substances dangereuses (carburants, solvant...) sont stockées dans des capacités fermées et étanches assurant leur confinement. Les aires de dépotage et d'utilisation de carburant sont munies de dispositifs de récupération (exemple : décanteurs déshuileurs, voile siphonoïde...) auxquels sont assujettis des protocoles de maintenance et de vidanges vers des filières de déchets autorisées.

Les espaces verts et les accotements des voiries du centre de stockage Cigéo, ainsi que les accotements de la déviation de la route départementale D60/960 et la végétation entourant le poste de transformation 400 kV/90 kV, sont entretenus sans l'emploi de produits phytosanitaires (périmètre de protection éloignée du captage de Rupt-aux-Nonains). Enfin, l'entretien de la plateforme ferroviaire et de ses accotements est réalisé avec des produits agréés et selon les enjeux des zones traversées (périmètre de protection d'un captage d'alimentation en eau potable, zone Natura 2000...).

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 » (cf. Figure 2-1). Ce type dispositif permet d'éviter la dispersion de légionnelles.



Figure 2-1 Photographie illustrative de refroidisseurs à circuit fermé

2.2.2 Les mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions chimiques atmosphériques

Les mesures d'évitement et de réduction pour les émissions atmosphériques sont détaillées au chapitre 2.4 du volume IV de la présente étude d'impact.

2.2.2.1 Les mesures d'évitement

Les principales mesures pour éviter les émissions atmosphériques (poussières, gaz de combustion associés aux transports) sont les suivantes :

- la réutilisation de l'ancienne plateforme ferroviaire pour la construction de l'installation terminale embranchée et d'anciens terrains industriels déjà nivelés pour l'installation de la plateforme logistique de Gondrecourt-le-Château (cf. Figure 2-2) qui permet d'éviter des quantités de poussières liées aux travaux de terrassement ;
- la localisation de la zone de dépôt des verses en zone puits, au plus près de leur remontée par le puit « matériels et matériaux travaux », qui permet d'éviter l'émission de polluants et de poussières liés à la circulation de camion pour leur transport ;
- le transport des verses et matériaux issus de la zone descenderie par un convoyeur à bande transporteuse semi-enterré (cf. Figure 1-5), qui permet d'éviter l'émission de polluants et de poussières liés à la circulation de camion pour leur transport entre la zone descenderie et la zone puits.

L'hexafluorure de soufre (SF_6), présent au niveau des postes de transformation et de livraison électriques, est contenu au sein de compartiments étanches, équipés d'un dispositif de contrôle et d'alarme en cas de baisse de pression de l'hexafluorure de soufre. Des mesures de récupération de cet hexafluorure de soufre sont prévues lors de toute intervention de maintenance, qu'elle soit programmée ou déclenchée suite à une alarme.



Figure 2-2 Vue de l'ancienne plateforme ferroviaire et du terrain industriel de Gondrecourt-le-Château

2.2.2.2 Les mesures de réduction

Des mesures de réduction des émissions atmosphériques qui ne peuvent être évitées sont également prévues. Il s'agit notamment de :

- la végétalisation progressive des versants qui permet de réduire la surface d'émission de poussières d'argiles soumise aux intempéries, et notamment au vent ;
- l'arrosage des pistes (présentes en phase d'aménagements préalables) et des versants par temps sec qui permet de réduire la remise en suspension de poussières (cf. Figure 2-3) ;
- la limitation de la vitesse des véhicules et la réalisation des revêtements au plus tôt sur les pistes empruntées par les véhicules afin de limiter les émissions de poussières par « roulage ». La limitation de la vitesse des véhicules et des engins contribuera à la réduction des envols de poussières, tout en réduisant les émissions de gaz d'échappement (et en favorisant la sécurité des intervenants sur le chantier) ;
- les camions transportant des terres sont bâchés en cas de besoin (par exemple en cas de vents forts) ;
- la mise en œuvre de dispositifs de capotage et d'aspiration et/ou de filtration pour les installations de manipulation, de transvasement et de transport de produits pulvérulents.



Figure 2-3 Vue de l'arrosage de pistes pour limiter l'envol de poussières par temps sec

Des modalités de suivi de la qualité de l'air sont effectuées tout au long des phases de déploiement du centre de stockage Cigéo pour garantir l'absence de dépassement des seuils de la qualité de l'air, et renforcer les mesures de réduction si nécessaire.

2.3 Incidences résiduelles liées aux émissions chimiques sur la santé humaine

La caractérisation des substances chimiques émises par le projet global Cigéo présentant un danger pour la santé humaine comprend une étape de sélection 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, les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine sont comparés aux valeurs réglementaires ou de références disponibles pour déterminer le risque sanitaire.

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

La méthodologie détaillée est présentée dans le chapitre 17.2 du volume VII de la présente étude d'impact. Sont détaillées dans les chapitres suivants les étapes qui ont permis de calculer les expositions humaines et d'analyser les risques et les incidences résiduelles pour la santé humaine des émissions chimiques.

2.3.1 La caractérisation des émissions chimiques

2.3.1.1 La localisation des émissions chimiques liquides

Les eaux générées et/ou gérées sur les différents lieux d'implantation et pendant toutes les phases du projet global Cigéo (eaux pluviales, eaux usées, eaux de ruissellement sur les versants, eaux d'exhaure, eaux de fond et eaux industrielles) et leurs modes de gestion sont présentés au chapitre 5.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

a) Centre de stockage Cigéo

La localisation des rejets d'eaux pendant la phase d'aménagements préalables varie en fonction de la localisation des zones de terrassement, de travaux et de chantiers en réalisation. Les eaux pluviales et les eaux usées sont collectées, traitées (ouvrages d'assainissement) et rejetées (ouvrages diffusifs) séparément.

Les dispositifs définitifs de gestion des eaux sont construits pendant la phase d'aménagements préalables et ils sont opérationnels dès la phase de construction initiale. Ces dispositifs quantitatifs et qualitatifs sont également détaillés au chapitre 5.3 du volume IV de la présente étude d'impact).

Les ouvrages de rejet des eaux des phases de construction initiale et de fonctionnement, ainsi que leur localisation sont présentés dans le tableau 2-4 ci-après.

Tableau 2-4 Localisation des effluents conventionnels du centre de stockage Cigéo

Zone	Bassin versant	Type d'ouvrage de rejet et masse d'eau concernée	Type de rejet épuré			
			Eaux pluviales	Eaux de ruissellement sur les verses	Eaux usées	Eaux de fond
Zone descenderie	Nord	Bassin connecté à La Bureau via une canalisation	X	-	X	X
	Sud	Ouvrage de diffusion non connecté à l'Orge	X	-	-	-
Zone puits	Nord et Sud	Ouvrage de diffusion non connecté à l'Ormançon	X	-	X	X
	Verses	Ouvrage de diffusion non connecté à l'Ormançon	-	X	-	-
Liaison intersites	Nord	Bassin connecté à La Bureau via une canalisation	X	-	-	-
	Sud	Ouvrage de diffusion non connecté à l'Ormançon	X	-	-	-
Installation du Terminal Embranchée	Sud	2 Bassins non connectés à l'Orge	X	-	-	-

b) Opérations des autres maîtres d'ouvrage

Les eaux pluviales de ruissellement sur les surfaces imperméabilisées du poste de transformation électrique 400/90 kV sont infiltrées, soit directement lorsqu'elles ne présentent pas de risque de pollution, soit après un passage dans un dispositif de traitement le cas échéant.

Pour les postes électriques de livraison 90 kV, situés au niveau des zones descenderie et puits, accolés aux postes de transformation 90/20 kV, les eaux pluviales sont reprises par le dispositif de gestion de ces eaux du centre de stockage Cigéo.

Sur la ligne ferroviaire 027000, il est prévu une remise à niveau des anciens dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux pluviales ainsi que la création de nouveaux dispositifs de gestion des eaux adaptés aux éventuels ouvrages d'art à construire. Pour rappel, l'eau de pluie tombant sur la plateforme de ferroviaire s'infiltrer dans le massif du Ballast.

La conception de la route département est réalisée selon les normes environnementales en vigueur. Les détails sur le dispositif d'assainissement seront présentés dans les versions actualisées de la présente étude d'impact en fonction de l'avancée de la conception de l'opération.

Compte tenu des mesures d'évitement et de réduction mises en place, la bonne qualité chimique et écologique des eaux rejetées (avec des paramètres contrôlés inférieurs aux valeurs de référence fixées par la directive cadre sur l'eau) et les mécanismes de transfert à travers le milieu récepteur (dilution, filtration) assurent l'absence d'une dégradation potentielle de la qualité actuelle des eaux nécessaire à son usage dans l'aire d'étude éloignée du projet global Cigéo. Ainsi, les émissions liquides (eaux rejetées) ne sont pas considérées comme une source d'émissions dangereuses pour la santé des populations.

2.3.1.2 La localisation des émissions chimiques atmosphériques

Pendant les phases d'aménagements préalables et de construction initiale, les émissions atmosphériques chimiques sont principalement diffuses. Elles peuvent se produire au niveau de toutes les zones d'interventions potentielles de toutes les opérations en lien avec les travaux de terrassement et de construction (cf. Figure 4-3 du chapitre 4.2 du volume II de la présente étude d'impact). Ces émissions, en l'absence de phasage précis des travaux, n'ont pu être évaluées au niveau du projet global. Les mesures d'évitement et de réduction mises en œuvre vis-à-vis de ces émissions ont pour objectif de garantir l'absence de dépassement des seuils de la qualité

de l'air (cf. Chapitre 2.2.2 du présent volume de l'étude d'impact). Une modélisation (complexe) est en cours de mise au point et les émissions chimiques atmosphériques associées seront précisées lors de l'actualisation ultérieure de l'étude d'impact.

En phase de fonctionnement, les 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 (cf. Figure 2-4). Elles persistent pendant tout la phase de fonctionnement du projet global Cigéo.

La localisation des sources d'émissions atmosphériques chimiques en phase de fonctionnement, ainsi que leur type et leur nature, sont restituées dans le tableau 2-5 ci-après.

Tableau 2-5 Localisation des sources d'émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo en phase de fonctionnement

Sources d'émissions atmosphériques	Nature des émissions	Type d'émission	Localisation des sources d'émissions
Centrale à béton	Poussières	Émission canalisée	Zone puits
Ventilation de l'installation souterraine (zone travaux)	Poussières, oxydes d'azote (NOx), oxydes de soufre (SOx), monoxyde de carbone (CO), hydrocarbure/Composés Organiques volatiles (COV)	Émission canalisée	Zone puits (puits « ventilation air vicié travaux »)
Ventilation de l'installation souterraine (zone exploitation)	Poussières, oxydes d'azote (NOx), monoxyde de carbone (CO), oxydes de soufre (SOx), hydrocarbure/Composés Organiques volatiles (COV), aérosols et gaz radioactifs	Émission canalisée	Zone puits (puits « ventilation air vicié exploitation »)
Atelier de maintenance	Poussières, oxydes d'azote (NOx), monoxyde de carbone (CO), oxydes de soufre (SOx), Composés Organiques Volatiles (COV)	Émission canalisée	Zone puits
Chaudières	Poussières, oxydes d'azote (NOx), oxydes de soufre (SOx)	Émission canalisée	Zone descenderie et zone puits
Zone de dépôt des verses	Poussières (envol)	Émission diffuse	Zone puits
Véhicules (poids lourds et véhicules légers)	Poussières, oxydes d'azote (NOx), monoxyde de carbone (CO), hydrocarbure/Composés Organiques Volatiles (COV)	Émission diffuse	Zone descenderie, zone puits, liaison intersites, déviation de la route départementale D60/960, trafic extérieur induit par l'activité du centre de stockage Cigéo
Engins de chantier (gestion des verses)	Poussières, oxydes d'azote (NOx), monoxyde de carbone (CO), hydrocarbure/Composés Organiques Volatiles (COV)	Émission diffuse	Zone puits
Trains (locomotive thermique)	Poussières, oxydes d'azote (NOx), monoxyde de carbone (CO), hydrocarbure/composés organiques volatiles (COV)	Émission diffuse	Installation terminale embranchée et ligne ferroviaire 027000
Fonctionnement du poste électrique et des lignes aériennes à haute tension	Ozone	Émission diffuse	Alimentation électrique

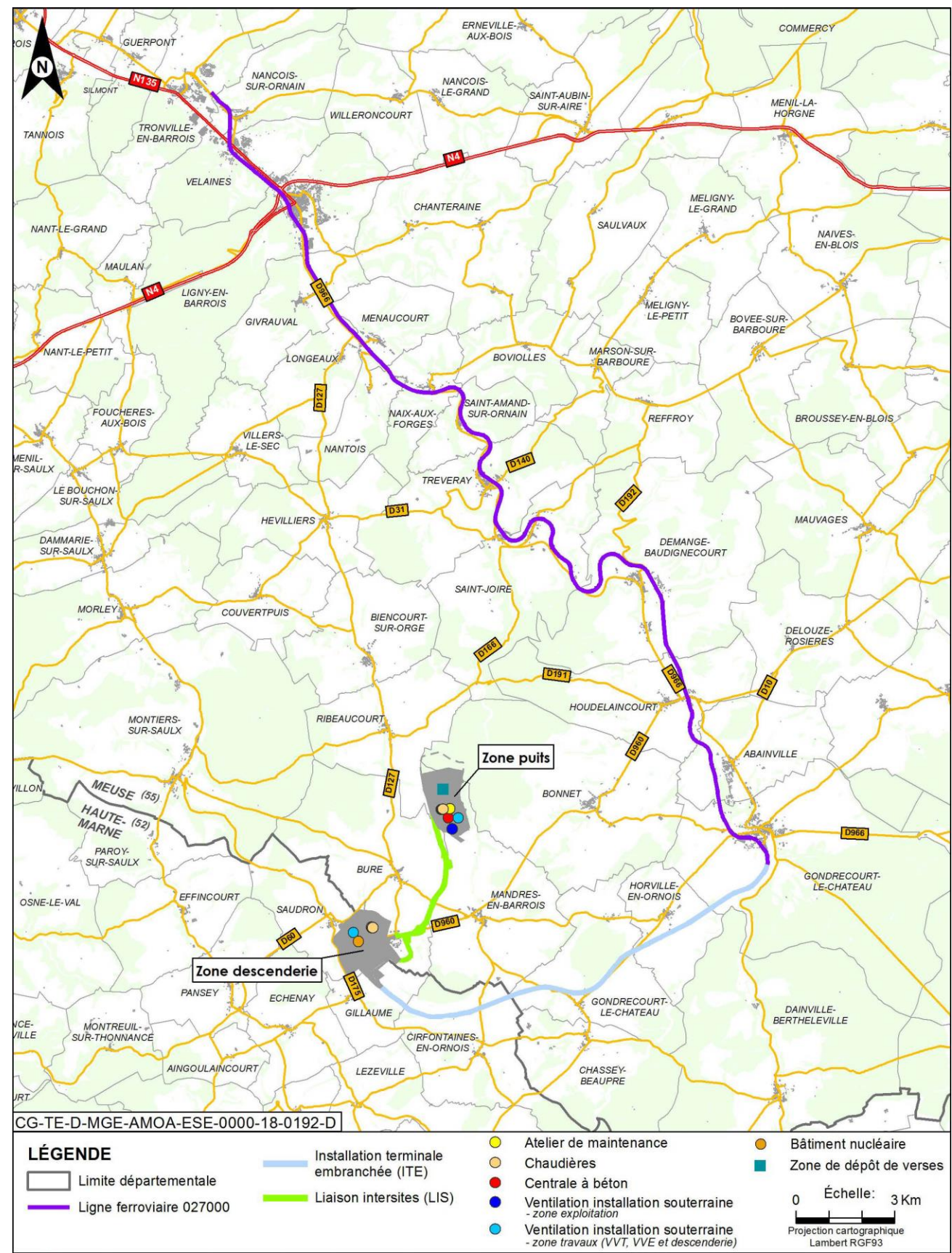


Figure 2-4 Localisation des sources d'émissions atmosphériques en phase de fonctionnement

Les câbles électriques à très haute tension (au sein du poste de transformation 400/90 kV et sur la ligne électrique aérienne 400 kV Houdreville-Méry) émettent de l'ozone, mais il s'agit d'un phénomène de faible ampleur. Une campagne de mesure réalisée à l'aplomb de lignes 400 kV a montré un accroissement de la quantité d'ozone dans l'air de l'ordre de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau du sol. C'est un apport faible par rapport à la présence d'ozone naturel qui peut varier de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la nuit à une centaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le jour, en fonction de l'ensoleillement. Ainsi, les émissions d'ozone du projet global Cigéo ne sont pas considérées comme une source d'émissions dangereuses pour la santé des populations.

Enfin, compte tenu des mesures d'évitement mises en place sur le poste de transformation 400/90 kV et les refroidisseurs du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 2.2.1 du présent volume de l'étude d'impact), le projet n'est pas source d'émissions d'hexafluorure de soufre et de légionnelles dans l'air.

2.3.1.3 La sélection des substances d'intérêt

L'étude des incidences liées aux émissions de composés chimiques dangereux sur la santé humaine (cf. Chapitre 2.1 du présent volume de l'étude d'impact) 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 (19).

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), à défaut réglementaires ou de gestion (cf. Chapitre 2.3.1.4 de la présente étude d'impact).

Compte tenu des mesures mises en œuvre permettant d'atteindre la bonne qualité chimique et écologique des eaux rejetées (cf. chapitre 2.2.1 du présent volume de l'étude d'impact), aucun traceur de risque de substances chimiques dangereuses liquides n'est identifié.

Les composés chimiques dangereux pour la santé humaine émis dans l'atmosphère par le projet global Cigéo sont les composés organiques volatils (COV), les poussières (dont des PM_{10}), les oxydes d'azote (dont le dioxyde d'azote), le monoxyde de carbone et les oxydes de soufre (dont le dioxyde de soufre). Les métaux et les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques ne sont pas retenus à ce stade, émis uniquement par la petite centrale à enrobé mobile utilisée pendant la phase d'aménagements préalables (qui fera l'objet de modélisations ultérieures, cf. Chapitre 2.3.1.2 du présent volume de l'étude d'impact). Les émissions associées à cette centrale sont faibles, très localisées, de courte durée (mise en place de quelques revêtements bitumineux) et la dilution des gaz d'échappement dans l'atmosphère est rapide.

Les substances d'intérêt retenues pour l'évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques du projet global sur la santé humaine sont restituées dans le tableau 2-6 ci-dessous.

Tableau 2-6 *Liste des substances d'intérêt des émissions atmosphériques du projet global Cigéo*

Composés chimiques	Substances d'intérêt
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 .
Oxydes de soufre	Ils sont connus pour leurs effets sur la santé et aussi traceurs de la pollution atmosphérique, les oxydes de soufre ont été assimilés du dioxyde de Soufre .
Poussière (PM _{2,5} et PM ₁₀)*	Les poussières ont toutes été assimilées soit à des particules fines de 2,5 soit à des particules fines 10 µm de diamètre* (PM ₁₀), traceurs de la pollution de l'air. Les constituants minéraux des poussières des verses ont été considérés comme non dangereux pour la santé humaine au regard de la composition et des quantités émises de poussières de verses par le centre de stockage Cigéo,
Composés organiques volatils (COV)**	Les composés organiques volatils sont assimilés à la quantité de benzène en présence dans le carburant utilisé, connu pour sa forte toxicité.
Monoxyde de carbone	Le monoxyde de carbone est un traceur de risque.

* L'assimilation de toutes les poussières aux PM_{2,5} ou aux PM₁₀ est un choix majorant en l'absence de données sur la caractérisation des poussières.

** Les composés organiques volatils (COV) font partie des hydrocarbures imbrûlés lors de la combustion du carburant. Pour les COV, il est fait le choix de les assimiler à la quantité de benzène contenu dans le carburant utilisé pour les véhicules. Le benzène fait partie de la famille des COV les plus toxiques. D'un point de vue quantitatif, la proportion de benzène retenue représente 5 % de la quantité d'hydrocarbures consommée. Ce choix est majorant par rapport à la réglementation en vigueur qui stipule depuis le 1^{er} janvier 2000 que la teneur en benzène dans les carburants ne doit pas dépasser 1 % (directive n° 98/70/CE du 13 octobre 1998 (22) concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel et modifiant la directive 93/12/CEE du Conseil). 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.

2.3.1.4 Les relations dose-réponse

L'évaluation des risques sanitaires, selon la méthodologie recommandée par l'INERIS (19), est réalisée à l'aide des valeurs toxicologiques de référence (VTR), qui expriment la relation dose-réponse.

» DÉFINITION DE 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).

» DÉFINITION DES 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/m³ 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 appelé excès de risque unitaire (ERU) et s'exprime dans l'unité inverse de l'exposition ([mg/m³]⁻¹ pour l'inhalation).

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 (23). 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 autres substances d'intérêt, l'évaluation des risques sanitaires est réalisée en comparant les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine aux valeurs réglementaires ou de gestions disponibles.

Les émissions chimiques qui persistent pendant tout la phase 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, et leur potentiel cancérigène pour chaque substance d'intérêt retenue est identifiée dans le tableau 2-7 ci-après.

Tableau 2-7 *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
Poussières (PM _{2,5} ou PM ₁₀)	Non	Oui	Oui
Benzène	Oui	Oui	Oui

Les valeurs toxicologiques de référence disponibles sont présentées dans le tableau 2-8 ci-dessous.

Tableau 2-8 Valeurs toxicologiques de référence pour des expositions par inhalation

Composés	VTR	Durée d'exposition	Source	Effet critique/organe cible	Type de VTR
Monoxyde de carbone	10 000 µg/m³	8 h	OMS, 2000	Augmentation taux de carboxyhémoglobine*	Effets à seuil
Benzène	9,70 µg/m³	Année	ATSDR, 2007	Diminution du nombre de lymphocytes	Effets à seuil
	2,6 x 10 ⁻⁵ (µg/m³) ⁻¹	Année	ANSES, 2013	Leucémies aiguës	Effets sans seuil

* La VTR chronique pour une exposition par inhalation du monoxyde de carbone n'existe pas. Par défaut est utilisée la VTR aiguë par inhalation du monoxyde de carbone (8 h).

** La carboxyhémoglobine est toxique pour l'organisme car au lieu de transporter de l'oxygène dans l'organisme, elle transporte de l'oxyde de carbone. Les fumeurs présentent fréquemment des taux supérieurs à la normale de carboxyhémoglobine.

Aucune valeur toxicologique de référence n'a été identifiée pour le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et les poussières (PM₁₀ et PM_{2,5}).

Pour ces substances d'intérêt, les valeurs réglementaires (valeurs limites pour la protection des populations) ou de gestion (objectifs de qualité de l'air) disponibles sont présentées dans le tableau 2-9 ci-dessous. Ces valeurs de référence sont fournies sur 24 heures (moyenne journalière) pour les expositions aiguës, et sur un an (moyenne annuelle) pour les expositions chroniques.

Tableau 2-9 Valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles pour les substances d'intérêt retenues pour l'évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo

Substances d'intérêt	Moyenne annuelle (µg.m ⁻³)		Moyenne journalière (µg.m ⁻³)	
	Objectif de qualité de l'air	Valeur limite pour la protection de la santé humaine	Objectif de qualité de l'air	Valeur limite pour la protection de la santé humaine
Dioxyde d'azote	40	40	-	-
Dioxyde de soufre	50	-	-	125 (à ne pas dépasser plus de 3 fois par an)
PM _{2,5}	10	25	-	-
PM ₁₀	30	40	-	50 (à ne pas dépasser plus de 35 jours par an)
Benzène	2	5	-	-
Monoxyde de carbone	-	-	-	10 000

2.3.2 L'exposition humaine et les risques sur la santé humaine liés aux émissions chimiques

Les eaux rejetées (émissions chimiques liquides) ne sont pas considérées comme une source d'émissions dangereuses pour la santé des populations (cf. Chapitre 2.3.1.1 du présent volume de l'étude d'impact). L'exposition humaine liée à cette source d'émission ne présente pas de risque sanitaire.

2.3.2.1 La démarche d'évaluation de l'exposition humaine liées aux émissions chimiques

Pour l'évaluation de l'exposition humaine, le code de la santé publique recommande 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 descendrière, de la liaison intersites, de la déviation de la route départementale D60/960 et de l'installation terminale embranchée. 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 8 passages de trains par jour (cf. chapitre 12.1 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 aux émissions chimiques atmosphériques, le risque sanitaire associé est donc plus faible (cf. Chapitre 2.3.2.3 du présent volume de l'étude d'impact).

Ainsi, les populations retenues pour l'étude 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 proche 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 sensible).

Plusieurs voies d'exposition des populations à ces émissions chimiques atmosphériques sont possibles (cf. Figure 2-5) :

- la première est l'inhalation de gaz et poussières émis. Il s'agit d'une voie d'exposition directe ;
- la seconde, moins importante, est l'ingestion de poussières déposées. Il s'agit d'une voie d'exposition indirecte tenant compte des transferts de composés dans les sols.

L'inhalation est la voie d'exposition majoritaire et la plus toxique pour les substances chimiques d'intérêt émises par le projet. L'exposition par ingestion est négligeable par rapport à l'exposition par inhalation.

La modélisation de la dispersion des émissions chimiques atmosphériques permet d'estimer les concentrations atmosphériques moyennes annuelles des composés chimiques au niveau des populations retenues. Le logiciel utilisé pour modéliser cette dispersion est le logiciel Impact™ développé par ARIA Technologie (24). Cet outil est également l'outil de référence de nombreuses installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Les calculs d'exposition humaine liée aux émissions chimiques 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.

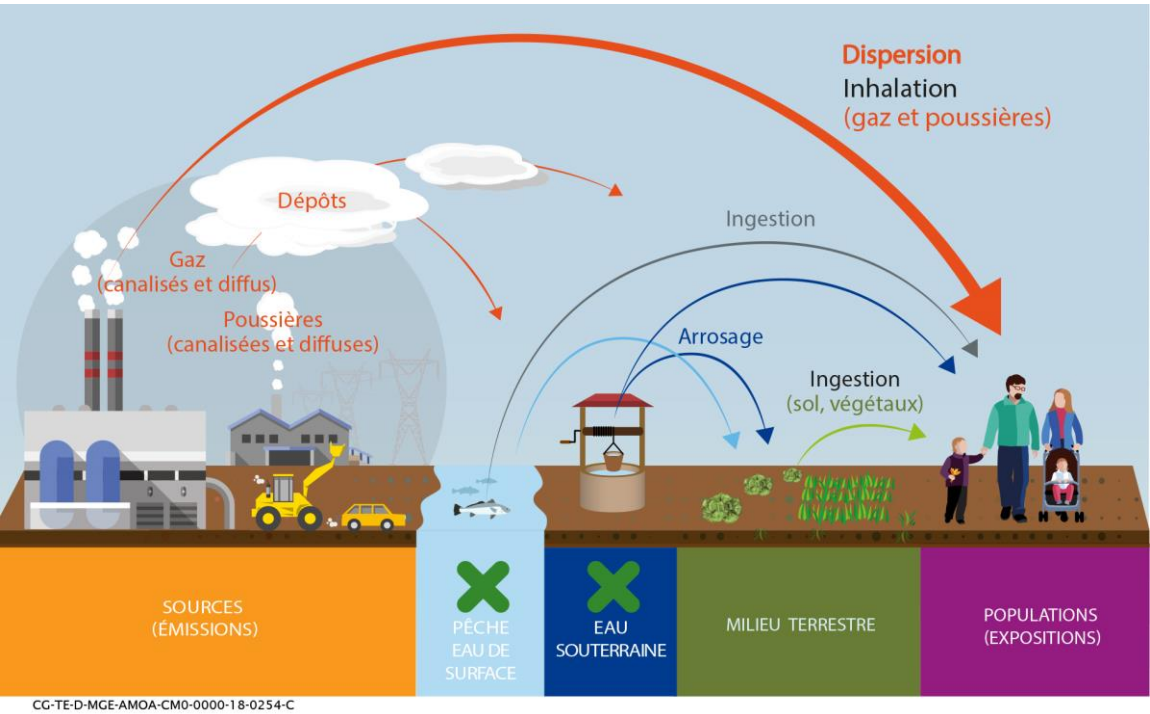


Figure 2-5 Schématisation des voies d'exposition des populations aux émissions chimiques du projet global Cigéo

2.3.2.2 L'évaluation de l'exposition humaine liée aux émissions chimiques

Les concentrations des composés chimiques présentés dans ce chapitre sont issus des résultats des modélisations des dispersions atmosphériques réalisées par le logiciel ARIA Impact (24) qui ont permis d'évaluer l'incidence sur la qualité de l'air du projet global Cigéo. Pour rappel, les concentrations moyennes annuelles maximales dans l'aire d'étude rapprochée du milieu physique du projet Cigéo sont présentées dans le chapitre 2.4.4.2 du volume IV. Ces concentrations maximales sont situées à proximité et au sud-sud-ouest de l'implantation de la zone de puits, en dehors des lieux d'habitation.

Contrairement à l'évaluation de l'incidence du projet sur la qualité de l'air, les concentrations moyennes obtenues au niveau des lieux d'habitation sont utilisées pour calculer l'exposition humaine par inhalation. Elle est exprimée en concentration moyenne inhalée ($\mu\text{g.m}^{-3}$).

En fonction des effets des différentes substances d'intérêt (composés chimiques toxiques), l'exposition humaine est évaluée à l'échelle de la journée (exposition aiguë) ou à l'échelle de l'année (exposition chronique).

Le tableau 2-10 ci-après présente les résultats de l'évaluation de l'exposition annuelle (exposition chronique) des populations liée aux émissions chimiques atmosphériques pour les substances d'intérêt comparées aux concentrations actuelles en polluants (bruit de fond) enregistrées sur l'aire rapprochée du milieu physique (cf. Chapitre 2.5.1 du volume III de la présente étude d'impact) et aux valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles associées (cf. Tableau 2-9).

Tableau 2-10 Exposition humaine annuelle liée aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo, bruit de fond et valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles associées

Substances d'intérêt (composés chimiques)	Concentrations moyennes annuelles (µg.m³.an⁻¹)										
	Populations								Bruit de fond	Objectifs de qualité	Valeur limite pour la protection de la santé humaine
	Gillaumé	Saudron	Mandres-en-Barrois	Ribeaucourt	Bure	Hôtel Restaurant du Bindeuil	École d'Échenay	Bonnet			
PM2,5 (Poussières)	<1	<1	<1	<1	1,4	2,1	<1	<1	8	10	25
PM10 (Poussières)	<1	1,7	1,5	1,1	2,5	3,9	<1	1,3	12	30	40
Dioxyde d'azote (oxydes d'azote)	<1	1,4	<1	<1	2,6	2,6	<1	<1	5	40	40
Dioxyde de soufre (oxydes de soufre)	0,1	0,25	0,17	0,1	0,5	0,5	0,1	0,1	2	50	-
Benzène (COV)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	0,6	2	5

Le tableau 2-11 ci-après présente les résultats de l'évaluation de l'exposition journalière (exposition aiguë) des populations liées aux émissions chimiques atmosphériques pour les substances d'intérêt comparées aux valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles associées (cf. Tableau 2-9). Il est à noter que depuis 2012, les concentrations moyennes annuelles du monoxyde carbone dans l'air (bruit de fond) sur l'aire rapprochée du milieu physique sont comprises entre 100 et 200 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Les résultats des modèles de dispersion sont des distributions d'une année de concentrations journalières sur l'aire rapprochée du milieu physique. Or la valeur réglementaire ou de gestion pour la protection de la santé humaine est parfois exprimée sous la forme d'une concentration à ne pas dépasser Y fois dans l'année. Pour comparer les résultats des modèles de dispersion à ces valeurs de protection, est déterminée pour chaque lieu d'habitation la valeur qui sépare les Y valeurs les plus élevées au « 365-Y » autres valeurs. Cette valeur sur une année est appelée le percentile $[(365-Y) / 365] \times 100$ de la distribution qui est ensuite comparé à la valeur limite de protection à ne pas dépasser Y fois dans l'année. À titre d'exemple le percentile 100 est la valeur maximale journalière obtenue sur une année.

Tableau 2-11 Exposition humaine journalière liée aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo, bruit de fond et valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles associées

Substances d'intérêt (composés chimiques)	Concentrations (µg.m ⁻³)								
	Populations								Valeur limite pour la protection de la santé humaine
	Gillaumé	Saudron	Mandres-en-Barrois	Ribeaucourt	Bure	Hôtel Restaurant du Bindeuil	École d'Échenay	Bonnet	
PM ₁₀ (Poussières) (Centile 90,4*)	2,4	4,2	3,7	2,3	5,9	8,2	1,7	2,5	50 (à ne pas dépasser plus de 35 jours par an)
Dioxyde de soufre (oxydes de soufre) (Centile 99,2**)	1,1	1,5	1,9	<1	3,1	3,3	<1	1,1	125 (à ne pas dépasser plus de 3 fois par an)
Monoxyde de carbone (Centile 100***)	28,4	66,8	66,2	19,1	61,5	84	18	27,5	10 000 (à ne pas dépasser plus de 8 heures par jour)

* Centile 90,4 : le centile ou percentile 90,4 correspond à la valeur respectée par 90,4 % des données journalières de l'année considérée, ne soit pas plus de 330 jours par an (ou dépassée par 9,6 % des données, soit 35 jours par an). À titre d'exemple, la valeur limite du centile 90,4 de la concentration journalière en PM₁₀, fixée à 50 µg.m⁻³, est équivalente à la valeur limite journalière de 50 µg.m⁻³ à ne pas dépasser plus de 35 jours/an.

** Centile 99,2 : le centile ou percentile 99,2 correspond à la valeur respectée par 99,2 % des données journalières de l'année considérée, ne soit pas plus de 362 jours par an (ou dépassée par 0,8 % des données, soit 3 jours par an). À titre d'exemple, la valeur limite du centile 99,2 de la concentration journalière en dioxyde de soufre, fixée à 125 µg.m⁻³, est équivalente à la valeur limite journalière de 125 µg.m⁻³ à ne pas dépasser plus de 3 jours/an.

*** Centile 100 : le centile ou le percentile 100 correspond à la valeur maximale des données journalières de l'année considérée. La valeur limite de concentration pour le monoxyde de carbone fixée à 10 000 µg.m⁻³ ne doit pas être dépassée plus de 8 heures par jour. En l'absence d'un indicateur pour cette durée, la concentration journalière maximale (centile 100) pour le monoxyde de carbone a été utilisée.

Les concentrations moyennes modélisées aux lieux d'habitation des populations les plus exposées sont très inférieures à celles du bruit de fond. Aucune habitation, ni aucun établissement accueillant du public ou des populations sensibles recensés dans l'aire d'étude rapprochée du milieu physique n'est exposé à des concentrations de composés chimiques toxiques dépassant les valeurs de référence de la réglementation (valeurs limites pour la protection de la santé humaine) ou de gestion (objectifs de qualité).

2.3.2.3 L'analyse du risque sanitaire lié aux émissions chimiques

Conformément à la méthodologie recommandée par l'INERIS (19), 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).

Le quotient de danger (QD), en présence d'effet à seuil, pour l'inhalation, est calculé à partir de la concentration (CI) comme suit :

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

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 :

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

Pour les effets sans seuil (cancérogènes), les expositions sont rapportées sur la vie entière (conventionnellement 70 ans) et pour rappel, l'ERU est la VTR pour les effets sans seuil (cf. Chapitre 2.3.1.4 du présent volume de l'étude d'impact).

Pour analyser les risques sanitaires, les indicateurs de risque (QD, ERI) sont comparés aux valeurs repères suivantes :

- les QD sont comparés à 1 ;
- les ERI sont comparés à 10⁻⁵.

Si les indicateurs de risque (QD, ERI) ne dépassent pas les valeurs repères fixées, les risques peuvent être considérés comme « non préoccupant ».

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.

Risque sanitaire lié au benzène

Le benzène est une substance d'intérêt possédant deux VTR, à effets avec et sans seuil.

L'analyse du risque sanitaire associé au benzène (substance d'intérêt des composés organiques volatils) est restituée dans le tableau 2-12 ci-après.

Tableau 2-12 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo lié au benzène (substance d'intérêt des composés organiques volatils)

	Benzène (substance d'intérêt des composés organiques volatils)		
	Concentration moyenne annuelle (µ g.m³.an⁻¹)	QD*	ERI*
Gillaumé	<0,001	< 0,0001	< 2,6 × 10 ⁻⁸
Saudron	<0,001	< 0,0001	< 2,6 × 10 ⁻⁸
Mandres- en-Barrois	<0,001	< 0,0001	< 2,6 × 10 ⁻⁸
Ribeaucourt	<0,001	< 0,0001	< 2,6 × 10 ⁻⁸
Bure	<0,001	< 0,0001	< 2,6 × 10 ⁻⁸
Hôtel-Restaurant di Bindeuil	0,002	0,0002	5,2 × 10 ⁻⁸
École d'Échenay	<0,001	< 0,0001	< 2,6 × 10 ⁻⁸
Bonnet	<0,001	< 0,0001	< 2,6 × 10 ⁻⁸
Valeur repères	-	< 1	< 10 ⁻⁵

*VTR à seuil chronique : 9,7 µ g.m³ ; **VTR sans seuil : 2,6 × 10⁻⁵ (µ g.m³)'

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. Le risque peut donc être considéré comme non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine.

Les émissions de composés organiques volatils par le projet n'ont pas d'effet notable sur la santé humaine.

Risque sanitaire lié au monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est une substance d'intérêt possédant une VTR, à effet sans seuil.

L'analyse du risque sanitaire associé au monoxyde de carbone est restituée dans le tableau 2-13 ci-après.

Tableau 2-13 Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo lié au monoxyde de Carbone

	Monoxyde de carbone	
	Concentration moyenne journalière (µ g.m³.j⁻¹)	QD*
Gillaumé	28,4	0,003
Saudron	66,9	0,007
Mandres-en-Barrois	66,2	0,007
Ribeaucourt	19,1	0,002
Bure	61,5	0,006
Hôtel-Restaurant du Bindeuil	84	0,008
École d'Échenay	18,1	0,002
Bonnet	28,7	0,003
Valeur repère	-	<1

* VTR à seuil chronique : 10 000 µ g.m³

Les quotients de danger (QD) calculés sont tous largement inférieurs à la valeur repère de 1. Le risque peut donc être considéré comme non préoccupant vis-à-vis de la santé humaine.

Risque sanitaire lié aux autres composés chimiques (poussières, oxyde d'azote et oxydes de soufre)

Il n'existe pas de valeur toxicologique de référence pour les poussières, 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 et de protection de la santé humaine (cf. Tableau 2-10 et tableau 2-11 du chapitre 2.3.2.2 du présent volume de l'étude d'impact).

2.3.3 L'appréciation des incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions chimiques

Aux lieux d'habitation des populations les plus exposées, les émissions chimiques du projet global Cigéo génèrent des concentrations inférieures à celles mesurées dans le bruit de fond actuel. Les expositions à ces émissions sont toutes à des niveaux largement inférieurs aux objectifs de qualité de l'air et aux valeurs limites pour la protection de la santé humaine. Les risques sanitaires évalués sont également très largement inférieurs aux valeurs repères de la méthodologie recommandée par l'INERIS (19)

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

2.4 Synthèse des incidences liées aux émissions chimiques sur la santé humaine

Le projet global Cigéo est à l'origine d'émissions chimiques (poussières, composés organiques volatils...) 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 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) (25).

Les émissions chimiques ont des incidences potentielles notables et elles font l'objet de mesures d'évitement et de réduction.

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) puis rejetées dans le milieu local, soit par des ouvrages de diffusion, soit par des canalisations.

L'ensemble des mesures d'évitement et de réduction associées à la gestion des eaux, ainsi que leur suivi sont restitués au chapitre 5.3 du volume IV de la présente étude d'impact. Sur l'ensemble du projet global, chaque type d'eaux fait l'objet d'une collecte et d'un traitement adapté afin que les eaux rejetées soient de bonne qualité chimique et écologique, avec des paramètres contrôlés inférieurs aux valeurs de référence fixées par la directive cadre sur l'eau. Ces eaux de bonne qualité rejetées dans le milieu récepteur naturel sont ensuite soit diluées dans un cours d'eau, soit filtrées par le sol. Sur le centre de stockage Cigéo, les eaux pluviales sont gérées séparément des autres types d'eaux, lorsque celles-ci ne sont pas recyclées, avant rejet.

En comparaison, la qualité chimique actuelle des cours d'eau est très variable avec :

- une dégradation récurrente liée à la présence d'hydrocarbures ;
- une qualité écologique des cours d'eau souvent classée en « état moyen » ;
- des masses d'eau des calcaires du Barrois et de l'Oxfordien calcaire qui subissent régulièrement des déclassements liés à la turbidité (matières en suspension) et à la présence de sulfates en concentration supérieure à la norme de qualité environnementale.

Les eaux générées puis rejetées par le projet global étant de bonne qualité, elles ne sont donc pas une source d'émissions chimiques liquides dangereuses pour la santé des populations.

Les émissions chimiques liquides du projet global Cigéo ont une incidence très faible sur la santé humaine

Les émissions chimiques atmosphériques

Les principales émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo dans ses premières phases (aménagements préalables et construction initiale) 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 phase de fonctionnement, les émissions chimiques sont principalement liées à la circulation des engins et des véhicules et au fonctionnement des installations, comme les chaudières, les centrales à béton et la ventilation des installations. Ce sont également 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 sont mises en place, notamment pour réduire les émissions de poussières et réduire les transports (source d'émission de gaz de combustion). L'ensemble de ces mesures et leur suivi sont restitués au chapitre 2.4.5 du volume IV de la présente étude d'impact. 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 descendrière 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 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) (25), 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 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 individus fréquentant l'Hôtel-restaurant du Bindeuil (Établissement Recevant Public) et l'école d'Échenay (établissement recevant une population sensible).

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 sont effectuées avec le logiciel Impact™ développé par ARIA Technologie, 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).

Les résultats de ces évaluations confirment qu'aucune habitation, ni aucun établissement accueillant du public ou des populations sensibles recensé dans l'aire d'étude rapprochée du milieu physique du projet global n'est exposé à des concentrations de composés chimiques toxiques 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 substances dites d'intérêts (benzène, représentatif des composés organiques volatils, et monoxyde de carbone), 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 largement inférieurs aux valeurs repères respectivement de 1 et de 10⁻⁵. 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 émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo ont une incidence très faible sur la santé humaine

3

Évaluation des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine

3.1	Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions radioactives	36
3.2	Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions radioactives	41
3.3	Incidences résiduelles liées aux émissions radioactives sur la santé humaine	43
3.4	Synthèse des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine	54



La grande dangerosité des déchets HA et MA-VL et leur longue durée de vie donnent aux générations qui bénéficient des avantages liés à l'industrie nucléaire, une responsabilité éthique : mettre en œuvre une solution de gestion qui permet d'assurer à court, moyen et long termes, la protection des hommes et de l'environnement du danger que présentent ces déchets.

Ainsi, le projet Cigéo est conçu pour confiner la radioactivité des déchets HA et MA-VL qui y seront réceptionnés et stockés pour garantir, sur de grandes échelles de temps, la protection de l'homme et de l'environnement. Pendant son fonctionnement, l'acheminement des colis de déchets radioactifs est réalisé avec des moyens de transport adaptés permettant le confinement de leur radioactivité.

Pour rappel, 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, soit pendant les phases d'aménagements préalables et de construction initiale.

Lorsque le centre de stockage Cigéo sera mis en service, après autorisation de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), 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 chaque étape avant leur stockage en alvéole.

L'évaluation de l'exposition des populations et des risques résiduels sanitaires associés à ces activités liées au fonctionnement du centre de stockage Cigéo est détaillée dans le présent chapitre de l'étude d'impact.

Une fois le centre de stockage Cigéo fermé (après autorisation de l'Autorité de sûreté Nucléaire), la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle sont stockés les colis de déchets radioactifs, située à environ 500 m de profondeur et âgée d'environ 160 millions d'années, constitue une barrière géologique naturelle entre le stockage et l'environnement. Cette couche, d'une épaisseur de 140 m à 160 m sur la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), possède des propriétés physico-chimiques favorables qui permettent de freiner le déplacement des éléments radioactifs qui restent pour l'essentiel piégés dans le stockage ou à proximité. Elle permet ainsi de répondre à l'objectif de protection de l'homme et de l'environnement à long terme sans intervention de celui-ci, c'est-à-dire de manière passive. L'évaluation de l'exposition humaine et des risques résiduels sanitaires après la fermeture du centre de stockage Cigéo est présentée au chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact.

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

Après une introduction sur les rayonnements ionisants et leurs effets sur la santé, les sources de dangers et les incidences potentielles des émissions radioactives du projet global sont présentées.

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 agro-alimentaire ainsi que des habitudes de vie et de consommation de l'homme.

L'exposition humaine ainsi évaluée est ensuite comparée à des valeurs seuils, fixées par la réglementation française ou à des objectifs plus ambitieux que se fixe l'Andra.

3.1 Sources de dangers et incidences potentielles sur la santé humaine des émissions radioactives

3.1.1 Les rayonnements ionisants et leurs effets sur la santé humaine

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

» DÉFINITION DES 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 3-1). La nocivité de ces éléments radioactifs dépend aussi de l'énergie mise en jeu lors de cette désintégration.

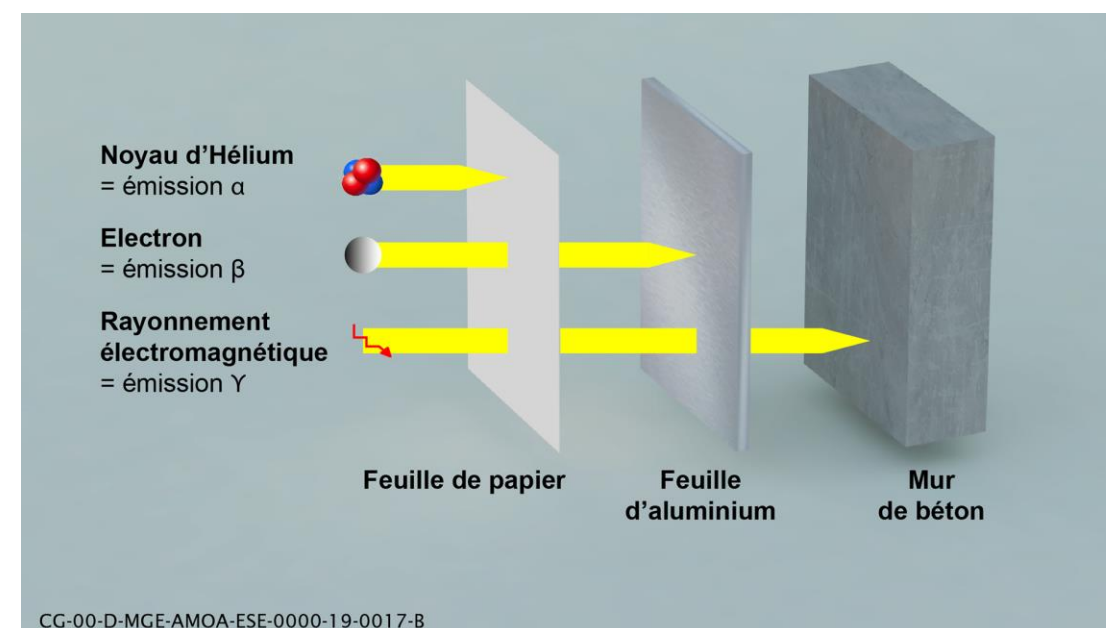


Figure 3-1 Illustration des trois types de rayonnements ionisants

Les effets des rayonnements ionisants sur l'homme résultent du transfert d'énergie du rayonnement (dont le niveau dépend de l'activité exprimée en Bq, nombre de désintégration par seconde) à la matière vivante notamment aux tissus et aux organes. Ce transfert d'énergie est illustré sur la figure 3-2.

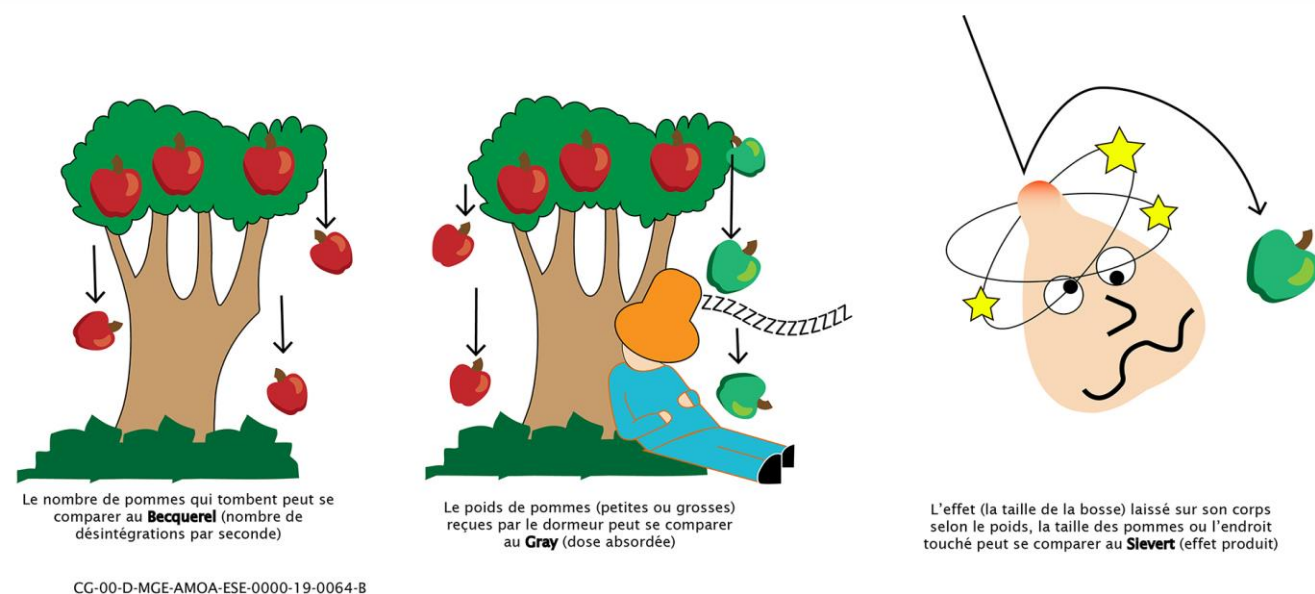


Figure 3-2 Illustration de l'effet de la radioactivité : du becquerel (Bq) au sievert (Sv)

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

- **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 éléments radioactifs 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.

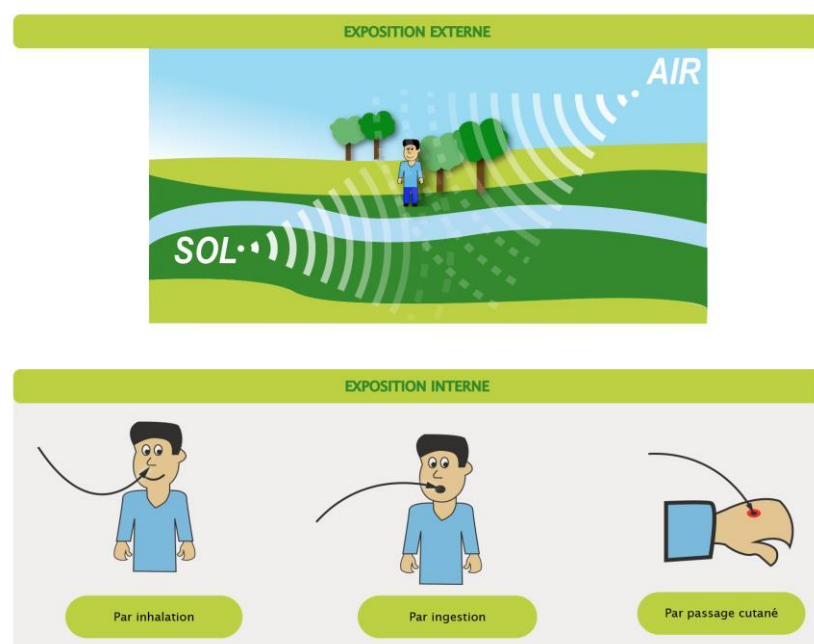


Figure 3-3 Illustration des types d'exposition à la radioactivité

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

Le becquerel représente la quantité d'énergie apportée par les rayonnements ionisants des éléments radioactifs.

► DÉFINITION DU 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 éléments radioactifs.

À titre d'exemple, d'après les données de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (26-28) :

- 1 litre d'eau de pluie présente une activité d'environ 1 Bq (essentiellement dû au tritium) ;
- 1 litre de lait présente une activité de 80 Bq (essentiellement dû au ^{40}K) ;
- 1 kg de pomme de terre présente une activité de 150 Bq (essentiellement dû au ^{40}K) ;
- 1 kg de sol sédimentaire présente une activité de 400 Bq (dus à l' ^{238}U , au ^{232}Th et descendants, et au ^{40}K) ;
- 1 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 ^{14}C).

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

► DÉFINITION DES 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. 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.

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 d'éléments radioactifs 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 3-4.

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.

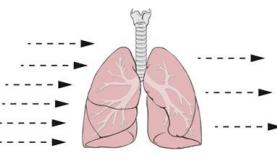
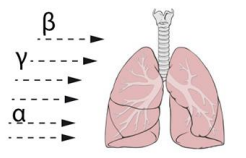
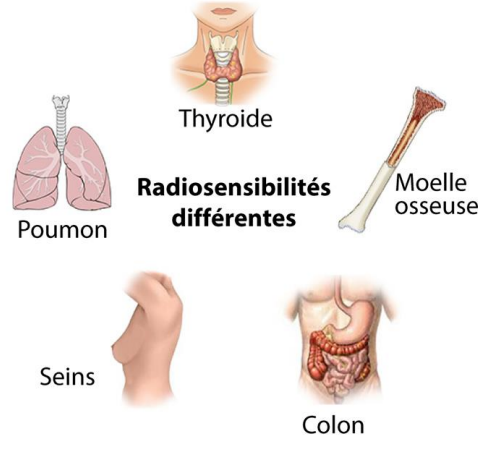
» DÉFINITION DES MODÈLES BIOCIÉTIQUES

Les modèles biocinétiques, ou modèles de transfert dans l'organisme, permettent d'identifier les organes sur lesquels les éléments radioactifs 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 éléments radioactifs 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 éléments radioactifs 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 éléments radioactifs 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 d'éléments radioactifs 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.

Dose absorbée	Dose équivalente	Dose efficace	Dose efficace engagée
Dépendant de la quantité absorbée	Dépendant du type de rayonnement	Dépendant de l'organe	Dépendant de la durée de vie de l'individu
			50 ans pour les adultes 70 ans pour les enfants

CG-00-D-MGE-AMOA-ESE-0000-19-0355-A

Figure 3-4 Illustration du passage de la dose absorbée à la dose efficace engagée

Des facteurs 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 (dose efficace engagée) est estimée :

- en évaluant, à partir des activités absorbées (Bq) par les individus et à l'aide de facteurs de dose spécifiques à chaque élément radioactif et chaque voie d'exposition, les doses efficaces engagées (Sv) de chacune des voies d'exposition, en distinguant si nécessaire les adultes des adolescents et 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 facteurs de dose efficace relatifs à l'exposition externe ne dépendent pas du métabolisme des personnes et ne varient donc pas en fonction de l'âge. En revanche, ces facteurs sont fonction de la nature de la source : exposition à l'air contenant les éléments radioactifs ou à un dépôt de sol, pour le domaine terrestre. Les facteurs 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 (29).

Les facteurs de dose efficace relatifs à l'incorporation d'éléments radioactifs par la voie interne (inhalation et ingestion) sont ceux préconisés par l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants (30). Ces facteurs spécifiques à chaque radioélément 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 d'éléments radioactifs 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'adolescent de 10 ans et 0,3 m³/h pour l'enfant).

Cas particulier du tritium

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 est plus de 10 000 fois plus radiotoxique que l'hydrogène tritié, mais reste bien moins radiotoxique que les autres types d'éléments radioactifs.

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 (31).

La réglementation française 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 :
 - ✓ la mise à l'abri, si la dose efficace prévisionnelle dépasse 10 mSv ;
 - ✓ l'évacuation, si la dose efficace prévisionnelle dépasse 50 mSv.

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 (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 (<https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon>).

En France, la fourchette basse de 1,6 mSv/an 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 (27). Les contributions au bruit de fond radiologique de ce niveau faible sont illustrées sur la figure 3-5 ci-dessous.

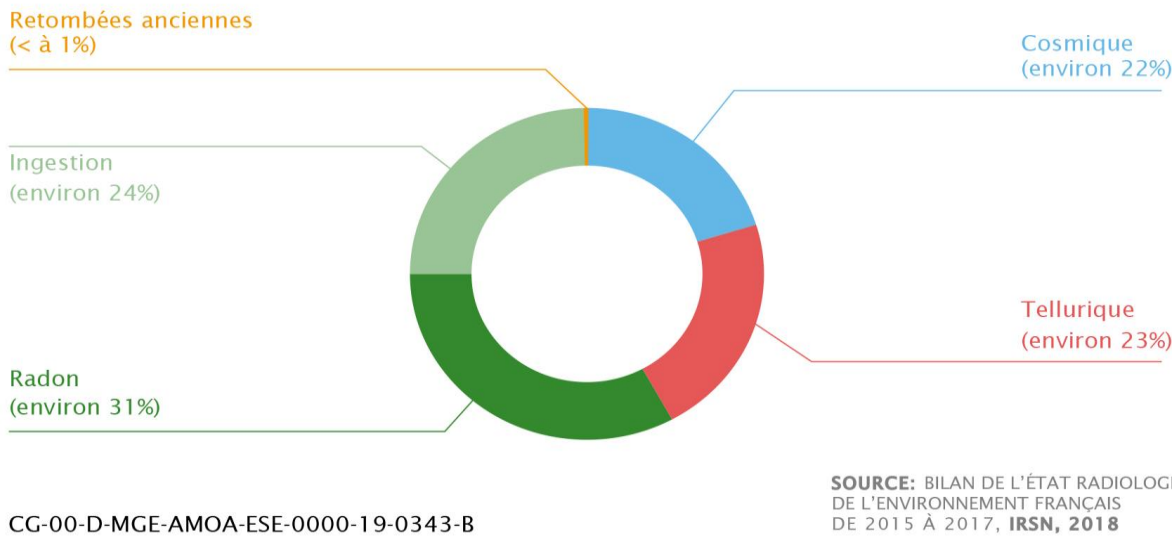


Figure 3-5 Contributions à une dose liée au bruit de fond radiologique français (fourchette basse de 1,6 mSv/an)

La fourchette haute a été évaluée à 8,6 mSv/an (27) 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.

Le niveau d'exposition ambiant dans le secteur de la Meuse/Haute-Marne (hors consommations et activités particulières humaines) correspond à une 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).

3.1.2 Les sources d'émissions radioactives du projet global Cigéo et leurs incidences potentielles

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 formation du Callovo-Oxfordien.

3.1.2.1 Les émissions liées au transport des colis de déchets

Pour pouvoir être transportés sur la voie publique, les colis de déchets radioactifs sont conditionnés (déchets solidifiés, 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 3-6 ci-dessous).



Figure 3-6 Photographie d'emballages de transport de déchets radioactifs sur un train

En France, le transport des déchets radioactifs est soumis à une réglementation stricte et à un suivi particulier (cf. Chapitre 17 du volume IV de la présente étude d'impact).

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).

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. Les critères de protection contre les rayonnements ionisants fixés par la réglementation sont les suivants :

- la contamination des surfaces accessibles de l'emballage de transport et du moyen de transport ne doit pas dépasser 4 Bq.cm^{-2} pour les éléments radioactifs émetteurs bêta et gamma et $0,4 \text{ Bq.cm}^{-2}$ pour les éléments radioactifs émetteurs alpha ;
- l'intensité de rayonnement maximale en tout point de la surface extérieure du moyen de transport ne doit pas dépasser 2 mSv.h^{-1} et elle ne doit pas dépasser $0,1 \text{ mSv.h}^{-1}$ à une distance de 2 m de l'emballage.

Ces critères ont été définis sur la base des recommandations de l'Agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA) (32), de la réglementation française et des conventions et accord européens relatifs au transport de marchandises dangereuses.

Au démarrage du fonctionnement du centre de stockage Cigéo, le flux de convois de déchets radioactifs acheminés par voie ferroviaire est estimé à environ 8 trains par an, puis, il s'intensifierait pour atteindre environ 76 trains par an, soit une moyenne d'environ 6 trains par mois, chaque train convoyant en moyenne 7 emballages de transport.

L'installation terminale embranchée est une infrastructure privée. Par ailleurs, le chemin longeant la voie n'est pas ouvert à la circulation des autres usagers. La largeur totale du fuseau (voie et chemin) s'élève à environ 55 m.

Compte tenu de ces éléments, l'exposition aux convois de transport est extrêmement faible et limitée dans le temps (trains circulant à 30 km/h sur l'installation terminale embranchée et 40 km/h sur la ligne ferroviaire 027000). Elle est largement inférieure à l'exposition liée aux émissions radioactives du centre de stockage Cigéo.

3.1.2.2 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, 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 et de contrôle avant leur stockage en alvéole dans l'installation souterraine.

Les émissions radioactives au sein des installations de Cigéo proviennent :

- du relâchement de certains éléments radioactifs gazeux (tritium, ^{14}C , ^{85}Kr), en très faible quantité, par les colis de déchets MA-VL ;
- de la présence potentielle de contamination sur les surfaces externes des colis de déchets qui sont réceptionnés, dans la limite acceptable de la réglementation des transports ;
- de la récupération d'effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires, relevant de la réglementation des installations nucléaires de base (INB) (1). Ces effluents sont susceptibles d'être récupérés en très faible quantité en phase de fonctionnement.

Les émissions gazeuses

Les émissions d'éléments radioactifs 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 éléments radioactifs gazeux suivants :

- du ^3H (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) sur l'air ;
- 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 éléments radioactifs, émis par certains colis de déchets MA-VL en très faible quantité (cf. Chapitre 3.3.1 du présent volume de l'étude d'impact), sont très faiblement radiotoxiques. Ils sont très volatils et restent à l'état gazeux, sans former d'aérosols.

Les émissions particulières

Les émissions particulières proviennent des aérosols (particules contenant des éléments radioactifs 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 3.3.1 du présent volume de l'étude d'impact) et mis en suspension lors de la manutention des colis de déchets ou par l'effet de la ventilation des locaux ou zones dans lesquels ils sont présents.

» DÉFINITION D'UN AÉROSOL

Un aérosol est un ensemble de fines particules, solides ou liquides, en suspension dans l'air.

Les incidences potentielles des émissions radioactives atmosphériques sur la santé humaine sont notables. Des mesures d'évitement et de réduction sont proposées (cf. Chapitre 3.2 du présent volume de l'étude d'impact).

Les effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires

Aucun procédé sur le centre de stockage de Cigéo ne génère d'effluents radioactifs liquides en fonctionnement normal. En effet, il n'y a aucune opération de traitement ou de conditionnement de déchets radioactifs sur le centre, et les colis de déchets radioactifs réceptionnés ne sont pas ouverts.

Par précaution, toutes les eaux récupérées dans les zones dites « à production possible de déchets nucléaires » (1) font l'objet d'une gestion séparée. Il s'agit des :

- condensats⁸ collectés en pied de cheminée des émissaires de la ventilation nucléaire, situés en zone descendrière et en zone puits ;
- eaux de ruissellement collectées au niveau des alvéoles dédiées aux colis de déchets HA de l'installation souterraine ;
- éventuelles eaux d'extinction incendie dans les zones nucléaires en exploitation.

Ces effluents sont considérés comme susceptibles d'être contaminés par la présence d'éléments radioactifs. Leur niveau de radioactivité est extrêmement faible, de l'ordre du Becquerel par litre (Bq/L). À titre de comparaison, le niveau de radioactivité naturelle de l'eau de pluie est d'environ 1 Bq/L.

Les incidences potentielles des effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires sur la santé humaine ne sont pas notables.

3.2 Mesures d'évitement et de réduction liées aux émissions radioactives

Les mesures mises en œuvre visent à la fois à éviter et à réduire les effets liés à la présence d'émissions radioactives.

3.2.1 Le conditionnement des déchets radioactifs

3.2.1.1 Le conditionnement définitif des déchets radioactifs, sur les sites des producteurs, selon les spécifications d'acceptation fixées par l'Andra

Les colis de déchets destinés au stockage sont soumis au respect de critères techniques, appelés « spécifications d'acceptation », élaborés et contrôlés par l'Andra. Le conditionnement des déchets, conformément à ces critères, est à la charge des producteurs.

S'ils peuvent être produits sous forme gazeuse, liquide ou solide, les déchets radioactifs à destination du centre de stockage Cigéo sont tous solidifiés et immobilisés sous une forme non dispersable. Les déchets les plus radioactifs, dit « de haute activité » (HA), sont notamment immobilisés dans une matrice en verre. Ils sont ensuite placés dans un conteneur fermé. Ce conteneur peut être en acier ou en béton (cf. Figure 3-7).



Figure 3-7 Exemples de de colis de déchets radioactifs HA (à gauche) et MA-VL (à droite)

La contamination surfacique labile des colis de déchets (aérosols radioactifs pouvant être présents sur la surface externe) ne doit pas dépasser 4 Bq/cm² pour les éléments radioactifs émetteurs bêta et gamma et 0.4 Bq/cm² pour les éléments radioactifs émetteurs alpha.

Par ailleurs, la production de gaz émis par les colis de déchets fait l'objet d'une déclaration préalable, et est portée à connaissance de l'Andra le plus en amont possible, par le biais de dossiers de connaissances des colis de déchets. Dans certains cas, la durée d'entreposage des colis sur le site de production en préalable à leur stockage sur Cigéo réduit certaines émissions, comme le tritium qui a une décroissance radioactive relativement rapide.

3.2.1.2 Le conditionnement des effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires, sur le centre de stockage Cigéo

Sur le site, les effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires seront stockés dans des cuves, protégées des agressions et équipées de rétentions étanches pour palier à une éventuelle fuite.

⁸ Les condensats sont les écoulements d'eau résultant de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air.

3.2.2 La conception des emballages de transport

3.2.2.1 Le transport des colis de déchets radioactifs, sous la responsabilité de l'expéditeur (producteurs), et leur contrôle

Les emballages et moyens de transport sur la voie publique sont conçus pour respecter des critères de protection vis-à-vis des rayonnements ionisants (cf. Chapitre 3.1.2.1 du présent volume de l'étude d'impact). Le transport est assuré sous la responsabilité de l'expéditeur (pour les colis de déchets HA et MA-VL, il s'agit des producteurs).

Ces critères de protection sont contrôlés à la fois au départ des sites des producteurs et à l'arrivée sur le centre de stockage Cigéo (cf. Figure 3-8).



Figure 3-8 Photographie illustrant le contrôle d'un emballage de transport

3.2.2.2 Le transport des effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires

Les cuves d'effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires sont transférées vers une installation nucléaire ou classée pour la protection de l'environnement, localisée en France, en mesure de les prendre en charge sans incidence notable sur son environnement. L'Andra dispose de ce type de filière dans le département de l'Aube (par exemple, le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage) à environ 50 km. Le transport de ces cuves est soumis à la réglementation transport de matières dangereuses (33) comme pour les colis de déchets radioactifs, avec toutefois des niveaux de radioactivité extrêmement faibles pour les cuves d'effluents du centre de stockage Cigéo. Les moyens de transports de ces cuves comprennent des dispositions permettant une prévention efficace des dégradations et une limitation de leurs conséquences éventuelles (robustesse, fiabilité et suivi particulier du transport).

3.2.3 La conception des installations du centre de stockage Cigéo

Les choix techniques de conception des installations du centre de stockage Cigéo visant à éviter et réduire les effets liés aux émissions radioactives, sont principalement :

- des ouvrages de génie civil (notamment le bâtiment nucléaire de surface et la tête de descenderie colis) conçus et positionnés (au centre de la zone descenderie, cf. Figure 3-9) pour assurer une protection radiologique contre les rayonnements ionisants ;

- des systèmes de ventilation dédié à la gestion des émissions radioactives (cf. Figure 3-12), avec :
 - ✓ une canalisation des émissions gazeuses et particulaires au sein des installations nucléaires en exploitation jusqu'à des émissaires, appelés « cheminées », permettant leur surveillance ;
 - ✓ un système de filtration à très haute efficacité permettant de retenir la majeure partie des aérosols radioactifs. Toutes les cellules de l'installation nucléaire de surface contenant des colis de déchets radioactifs, ainsi que le quartier de stockage des colis MA-VL ont à minima un niveau de filtration très haute efficacité (un filtre très haute efficacité, dit « filtre THE », permet de retenir au moins 99 % des aérosols). Ces filtres sont remplacés régulièrement afin de maintenir leur haut niveau d'efficacité ;
 - ✓ une hauteur des émissaires de rejets (cheminées) fournissant des conditions dispersion qui permettent de minimiser les incidences sur la santé, conformément à l'arrêté du 9 août 2013 relatif à la maîtrise des nuisances et des impacts sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base (34), à savoir de l'ordre de 12 m pour la cheminée de la zone puits et une trentaine de mètres par rapport au sol (cheminée d'environ 20 mètres en toit de l'installation nucléaire de surface) pour l'émissaire de la zone descenderie (cf. Chapitre 3.2 du présent volume de l'étude d'impact).
- des systèmes de collecte des effluents provenant des zones à production possible de déchets nucléaires au plus près de leur production, à savoir au pieds des émissaires de ventilation, en tête des alvéoles dédiées aux colis de déchets HA et dans des réservoirs enterrés dédiés à la collecte des eaux d'extinction incendie, permettant leur contrôle, un prétraitement éventuel sur site au moyen d'une unité mobile visant à les rendre compatibles avec la réglementation des transports si nécessaire et leur stockage temporaire (dans des cuves) avant leur transfert vers une installation de traitement externalisée.

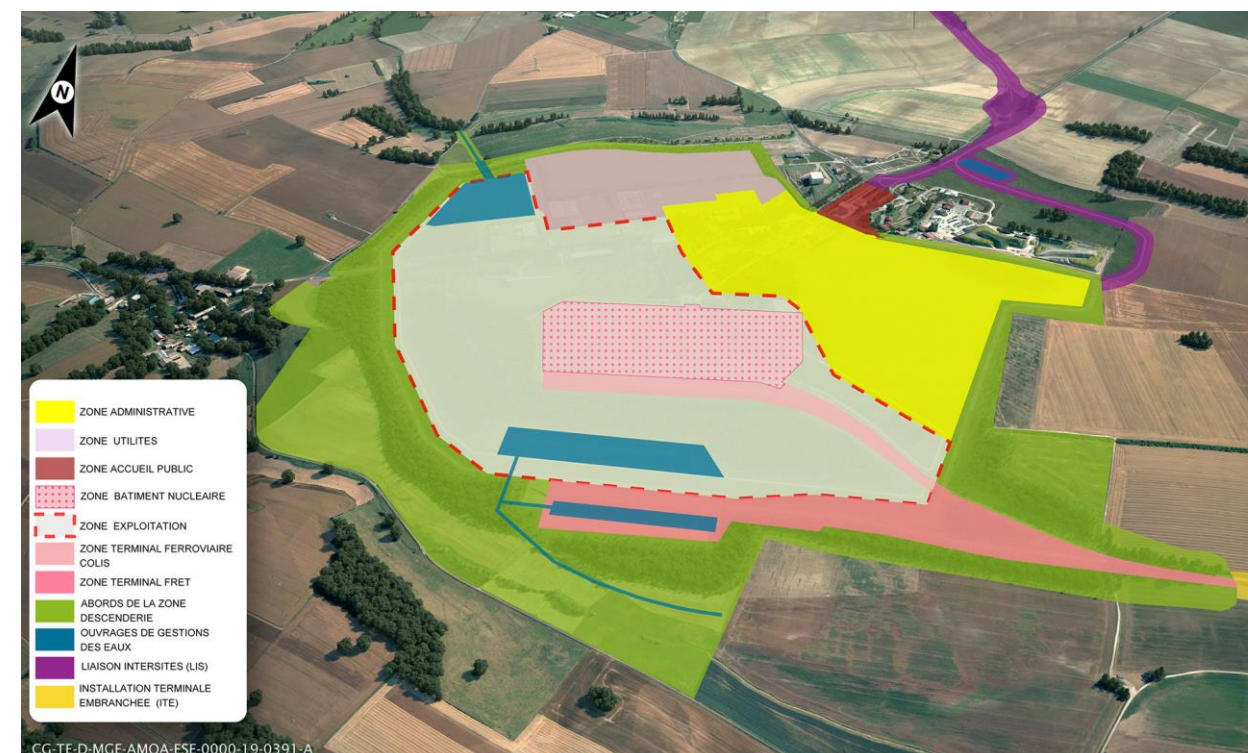


Figure 3-9 Localisation des ouvrages et installations de la zone descenderie

Par ailleurs, la contamination surfacique des colis de déchets est contrôlée à plusieurs étapes de l'acheminement et du transfert des colis de déchets au sein des installations afin de s'assurer qu'elle reste très faible (cf. Figure 3-10).

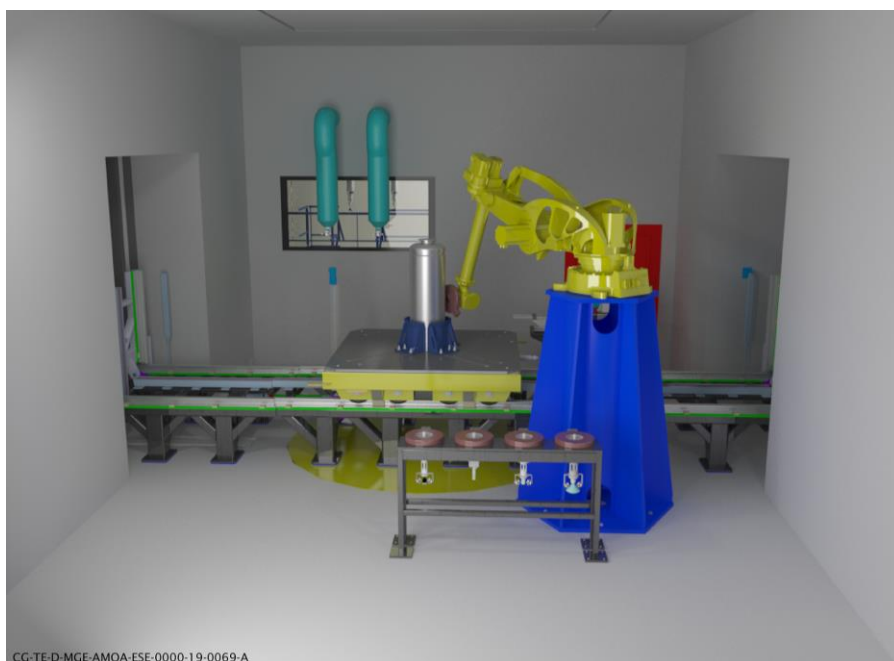


Figure 3-10 Illustration d'un contrôle de colis primaire au sein de l'installation nucléaire de surface du centre de stockage Cigéo

En outre, ces colis de déchets radioactifs, leurs moyens de transports ou de transfert au sein des installations et les installations elles-mêmes sont conçus pour résister à des agressions potentielles afin de limiter les effets d'un accident ou catastrophe majeurs sur l'environnement et la santé humaine (cf. Chapitre 17 du volume IV de la présente étude d'impact).

3.3 Incidences résiduelles liées aux émissions radioactives sur la santé humaine

Pour rappel, l'évaluation des incidences (effets) liées aux émissions radioactives sur la santé (cf. Chapitre 3.1.1 du présent volume de l'étude d'impact) est réalisée à partir des quantités d'éléments radioactifs rejetés. La modélisation de la dispersion de ces rejets de substances dans l'air ou dans l'eau permet de calculer les concentrations des éléments radioactifs 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 (cf. Figure 3-11), à savoir :

- une évaluation des rejets radioactifs (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 éléments radioactifs dans l'environnement et la chaîne agro-alimentaire (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.

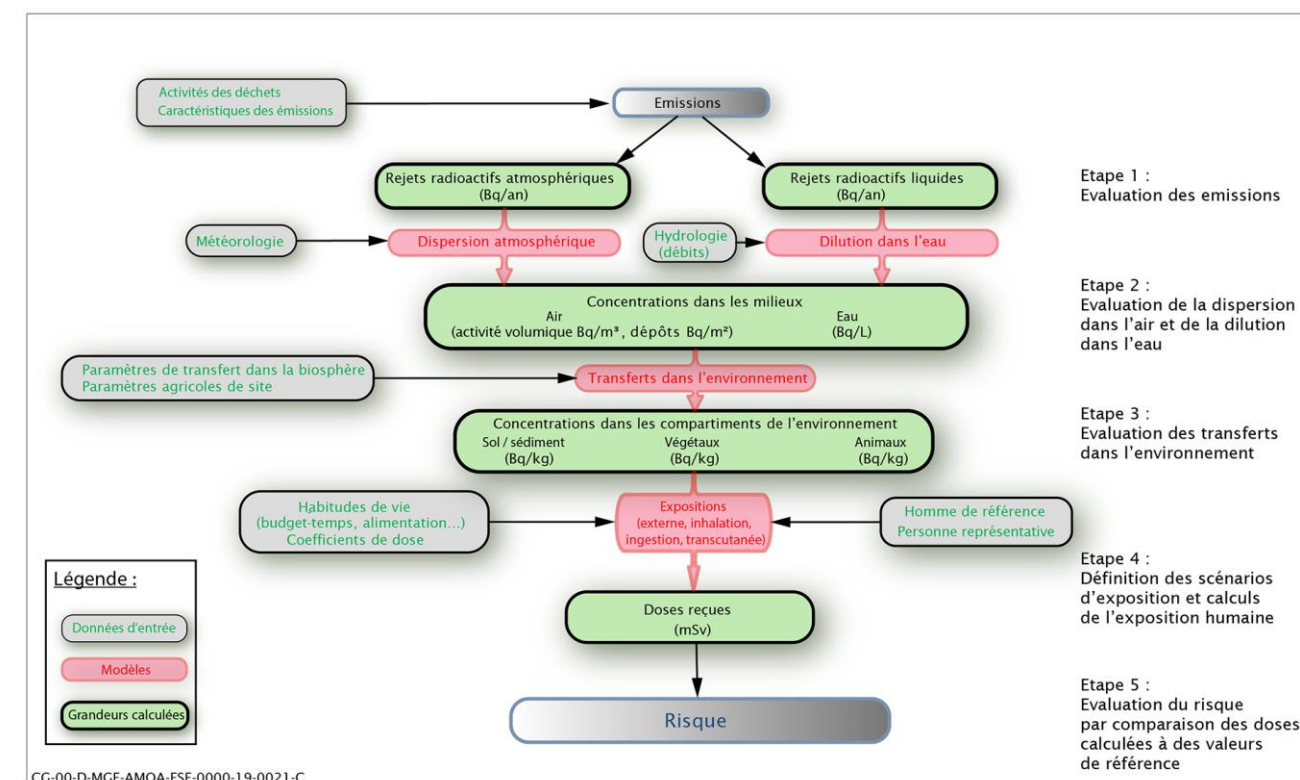


Figure 3-11 Démarche d'évaluation de l'exposition humaine et du risque sanitaire liée aux émissions radioactives

Le risque pour la santé humaine est ensuite analysé par comparaison de l'exposition humaine à des valeurs seuils fixées par la réglementation.

La méthode détaillée d'évaluation des incidences et des risques sur la santé humaine liés aux émissions radioactives est présentée au chapitre 17.1 du volume VII de la présente étude d'impact. Pour rappel, l'aire d'étude des incidences des émissions radioactives correspond à l'aire d'étude rapprochée du milieu physique du projet global (populations potentiellement soumises à des modifications de la qualité de l'air).

3.3.1 Les émissions radioactives liquides

Les effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires représentent de l'ordre de 0,15 m³/j au maximum au cours des premières décennies de fonctionnement. Leur niveau de radioactivité est extrêmement faible, de l'ordre du Becquerel par litre (Bq/L).

Comme indiqué au chapitre 3.2 du présent volume de l'étude d'impact, ces effluents font l'objet d'une gestion particulière sur le centre de stockage Cigéo. Ils sont collectés, contrôlés et stockés temporairement dans des cuves dédiées sur le site. L'Andra s'engage à ne pas les rejeter dans l'environnement local (cf. chapitre 2.7.4 du volume II de la présente étude d'impact), ils sont donc ensuite transférés vers une installation nucléaire ou classée pour la protection de l'environnement, localisée en France, en mesure de les prendre en charge sans incidence notable sur son environnement.

Le centre de stockage Cigéo ne rejette donc pas d'effluents liquides issus des zones à production possible de déchets nucléaires dans l'environnement local.

3.3.2 Les émissions radioactives atmosphériques

3.3.2.1 Les émissions radioactives atmosphériques

Comme présenté au chapitre 3.1.2 du présent volume de l'étude d'impact, 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 (éléments radioactifs émetteurs alpha et/ou bêta) qui peuvent être mis en suspension lors des opérations de manutention de ceux-ci 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 d'éléments radioactifs gazeux qui sont principalement les déchets de structure des combustibles usés des réacteurs à eau pressurisée compactés et conditionnés en conteneurs standards de déchets compactés et les déchets activés issus des réacteurs, sont considérés comme susceptibles d'être présents simultanément dans l'installation nucléaire de surface (réception et transfert) 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 éléments radioactifs 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 % (minimum requis par la norme de fabrication).

La méthode d'évaluation des émissions radioactives gazeuses est présentée en détail au chapitre 17.1.2 du volume VII de la présente étude d'impact.

La localisation des émissions radioactives atmosphériques

Les émissions gazeuses et particulaires liées à la présence de 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 permettant de les canaliser, de les filtrer et de les surveiller.

Ces émissaires, illustrés sur la figure 3-12, 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 m ;
- une cheminée en toit de l'installation nucléaire de surface située sur la zone descendrière, 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.

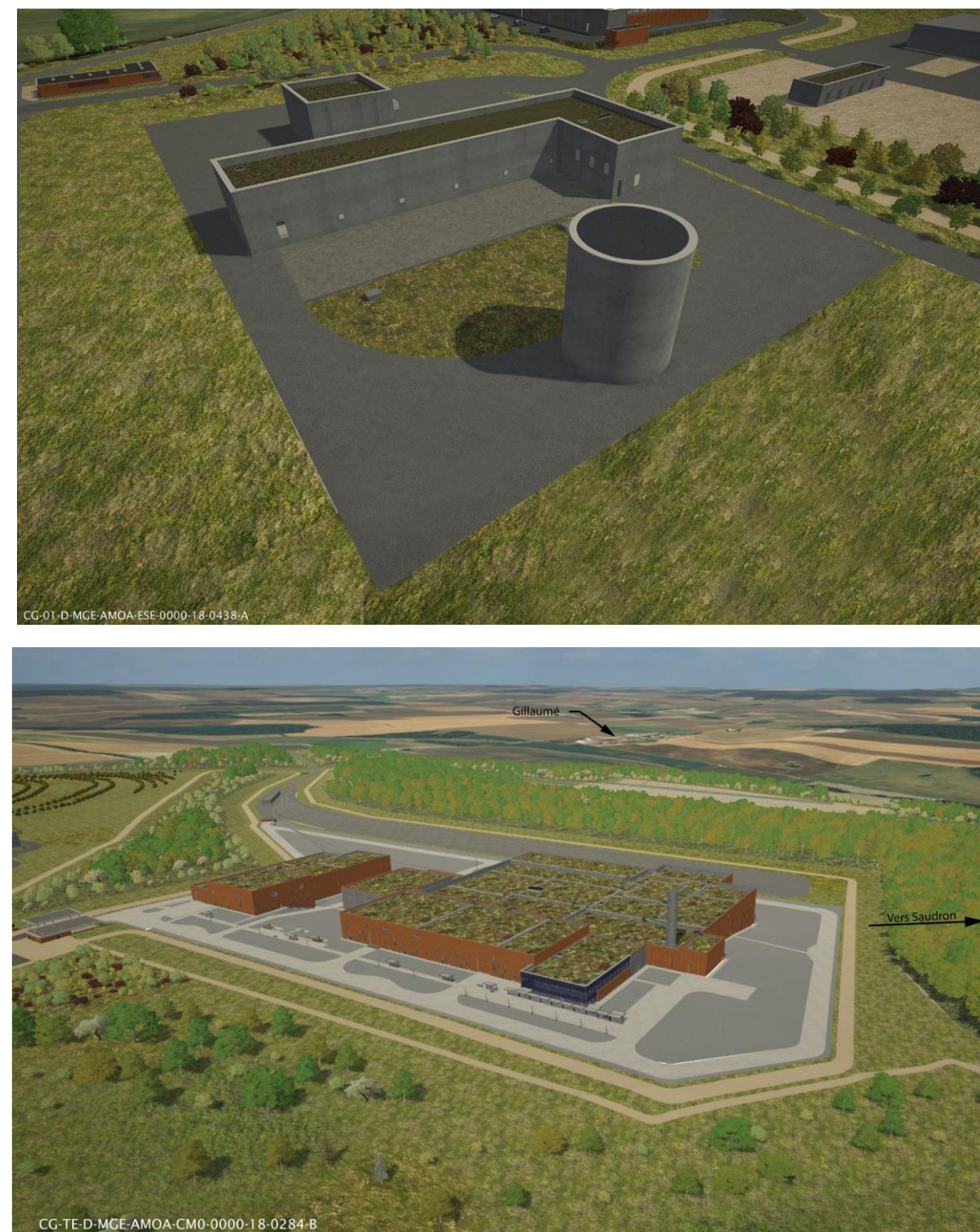


Figure 3-12

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 3-13 ci-dessous.

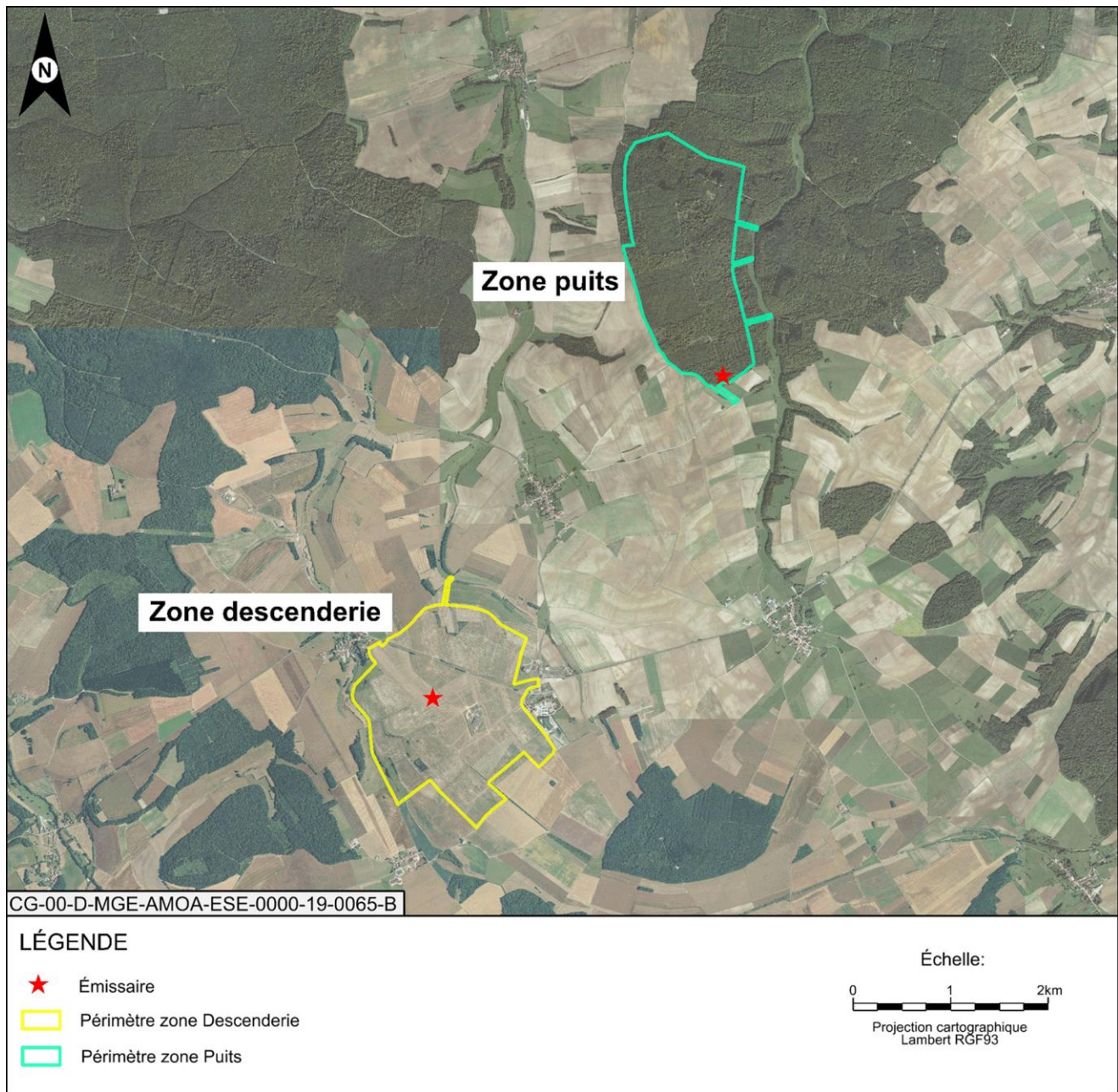


Figure 3-13 Localisation des émissaires de rejets atmosphériques radioactifs du centre de stockage Cigéo

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 d'éléments radioactifs 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 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 descendrière, sont présentés dans le tableau 3-1 ci-dessous.

Ces rejets sont exprimés en becquerel ou gigabecquerel par an.

» DÉFINITION DU GIGA

Giga (symbole G) est le préfixe du Système international d'unités (SI) qui représente 10⁹, soit un milliard de fois l'unité qui suit.

Tableau 3-1 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 555 Bq/an
Émetteurs alpha	de l'ordre de 55 Bq/an

Ces rejets radioactifs sont très faibles, notamment comparés aux demandes et autorisations de rejets d'autres installations nucléaires françaises (cf. Tableau 3-3).

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 3-2 ci-dessous.

Tableau 3-2 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 6 000 GBq/an
Émetteurs beta	de l'ordre de 300 000 Bq/an
Émetteurs alpha	de l'ordre de 30 000 Bq/an

Ces rejets sont globalement inférieurs ou du même ordre de grandeurs que les demandes et autorisations de rejets d'autres installations nucléaires françaises (cf. Tableau 3-3).

Tableau 3-3 Comparaison des rejets atmosphériques du centre de stockage Cigéo avec d'autres installations nucléaires de base françaises

Site	Type d'installation	Références	³ H	¹⁴ C	⁸⁵ Kr	Émetteurs bêta	Émetteurs alpha
			GBq/an	GBq/an	GBq/an	Bq/an	Bq/an
La Hague (ORANO)	Retraitement de combustibles usés	Arrêté du 8 janvier 2007 (35)	150 000	28 000	470 000 000	1 000 000 000	10 000 000
Nogent sur Seine (EDF)	Réacteurs nucléaires	Arrêté du 29 décembre 2004 (36)	8 000	1 400	45 000	800 000 000	0
Cadarache (CEA)	Entreposage de déchets radioactifs	Arrêté du 21 septembre 2017 (37)	3 000	0	0	10 000	160 000
CSA (Andra)	Stockage de déchets de faible et moyenne activité à vie courte	Arrêté du 21 août 2006 (38)	50	5	0	200 000	20 000
ICEDA (EDF Bugey)	Conditionnement et entreposage de déchets activés	Décision ASN 2014-DC-0443 du 15 juillet 2014 (39)	1 000	2	0	150 000 000	0
Cigéo (Andra)	Stockage de déchets de moyenne et haute activité, vie longue		de l'ordre de 300	de l'ordre de 300	de l'ordre de 6 000	de l'ordre de 300 000	de l'ordre de 30 000

3.3.2.2 La dispersion des rejets radioactifs

Pour rappel, les émissions radioactives dans les installations du centre de stockage sont canalisées et filtrées (permettant de retenir plus de 99 % 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 est la plateforme de calcul CERES (Code d'Évaluations Rapides Environnementales et Sanitaires) version 6.2.5, en particulier le module GASCON (40, 41), basé sur un modèle gaussien. Cet outil est également l'outil de référence du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives 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.

» DÉFINITION DES MODÈLES GAUSSIENS

Les modèles gaussiens permettent de simuler la dispersion atmosphérique de gaz et d'aérosols (de masse volumique proche de celle de l'air) via l'action du fluide porteur, l'air, à proximité de la source d'émission et jusqu'à plusieurs kilomètres. Le transport et la diffusion de ces gaz et aérosols dépendent du vent et de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique.

La modélisation de la dispersion permet de calculer les moyennes annuelles en concentrations dans l'air et en dépôts au sol de chaque élément radioactif rejeté au niveau des cheminées. Les étapes de cette modélisation sont représentées schématiquement sur la figure 3-14.

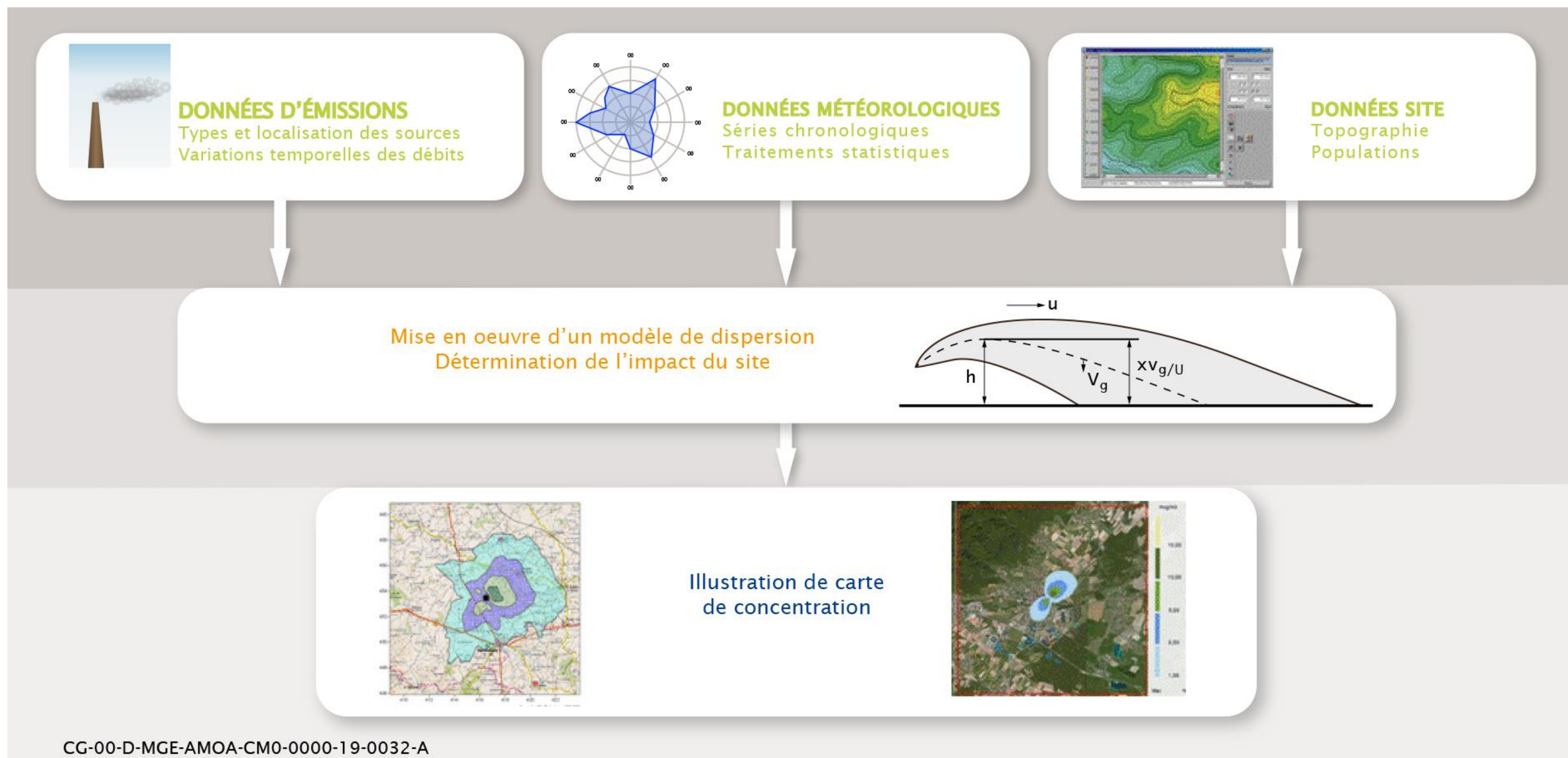


Figure 3-14 Illustration de la modélisation de la dispersion atmosphérique des gaz et aérosols rejetés par une installation

Les caractéristiques des rejets et le mode d'émission (cheminée de ventilation) sont décrits au chapitre 3.3.2.1 du présent volume de l'étude d'impact.

Les conditions météorologiques sont représentées par un jeu de paramètres : la direction du vent, la vitesse du vent, la température extérieure, la pluviométrie et la stabilité de l'atmosphère. Ces paramètres sont variables dans le temps et dans l'espace. Ils résultent de la superposition de phénomènes atmosphériques à grande échelle (régime cyclonique ou anticyclonique) et de phénomènes locaux (influence de l'occupation des sols, de la topographie). Pour être pertinents, ils doivent être déterminés à partir de chroniques météorologiques suffisamment longues et complètes, mais aussi représentatives de la climatologie locale.

Les paramètres météorologiques pour la modélisation de la dispersion atmosphérique sont donc calculés à partir des données d'une station météorologique représentative des conditions du site. Le choix de cette station météorologique doit tenir compte de :

- sa position géographique : la station retenue doit être la plus proche possible de l'installation et il ne doit pas exister d'obstacle majeur entre la station et la zone d'étude ;
- la cadence d'acquisition des données météorologiques : il existe des stations où certains paramètres sont mesurés toutes les heures et d'autres tous les jours. Les données les plus fines permettent de prendre en compte les phénomènes météorologiques temporels (notamment les phénomènes diurnes) ;
- le type de données météorologiques acquises par rapport au besoin de modélisation (direction et force du vent, pluviométrie, température).

La station météorologique d'Houdelaincourt de l'Andra est retenue pour les calculs de dispersion atmosphérique car elle fournit les conditions de vent représentatives du site⁹. Elle est située au nord-est des installations du centre de stockage et à environ une dizaine de kilomètres à vol d'oiseau (cf. Figure 3-15).

Il est à noter que cette station météorologique a vocation à servir de référence pour le fond atmosphérique régional, et plus largement, de par sa situation (altitude, éloignée de toute perturbation telle que des bâtiments ou bosquets), pour le quart Nord Est de la France. D'ailleurs, elle est utilisée pour de nombreux réseaux de suivi de la qualité de l'air nationaux comme ATMO Grand Est, association à but non lucratif agréée par le Ministère chargé de l'environnement en charge de la surveillance de la qualité de l'air dans la région Grand Est, l'Observatoire Permanent de la Radioactivité de l'Air (réseau OPERA-Air de l'IRSN) et même internationaux tel que le réseau de suivi des gaz à effet de serre « Integrated Carbon Observation System » (ICOS).

Les données météorologiques de la station atmosphérique d'Houdelaincourt sont donc retenues comme données de référence pour l'évaluation de la dispersion des rejets radioactifs du centre de stockage Cigéo.



Figure 3-15 Photographie de la station atmosphérique d'Houdelaincourt

Une analyse statistique de ces données sur une période de 5 ans (2012 à 2017), suffisamment longue et complète¹⁰, mais aussi représentative de la climatologie locale, a été réalisée. La représentation des fréquences en direction et en force (vitesse) du vent obtenu à la station météorologique d'Houdelaincourt est présentée sur la figure 3-16. Les directions dominantes du vent apparaissent ainsi nettement.

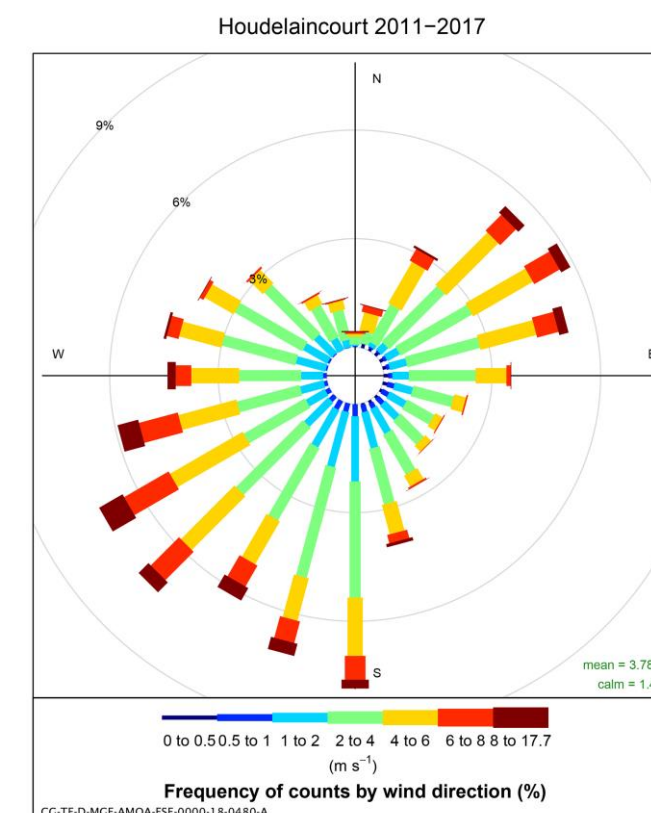


Figure 3-16 Roses des vents générales par classe de vitesse à la station atmosphérique d'Houdelaincourt (2011-2017)

⁹ Les données de la station météorologique de Saint-Dizier ne sont pas retenues pour cette évaluation car elle est située dans un contexte topographique différent du plateau du barrois. Ces données ne sont donc pas représentatives du site d'implantation du centre de stockage Cigéo. Comme mentionné au chapitre 2.2 du volume III de la présente étude d'impact, les données acquises depuis 1953 par cette station sont utilisées pour définir des conditions extrêmes ou historiques utilisées pour concevoir et protéger les installations des intempéries.

¹⁰ L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) recommande de prendre en compte une chronique d'au moins trois années avec une fréquence maximale tri-horaire pour représenter la variabilité interannuelles des conditions météorologiques (25).

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

Les rejets de l'installation souterraine représentent la source majoritaire : en effet, cette source représente plus de 80 % du niveau de radioactivité dans l'air et de dépôts au sol. Les rejets de l'installation nucléaire de surface, localisée sur la zone descendrière, sont négligeables devant ceux de la cheminée de l'installation souterraine.

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.

À titre d'illustration, des 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 3-17. 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 0,01 et 0,0001 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 (cf. Figure 3-16). 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 3-18). Les autres éléments radioactifs rejetés montrent des panaches semblables, avec des niveaux de concentration très faibles.

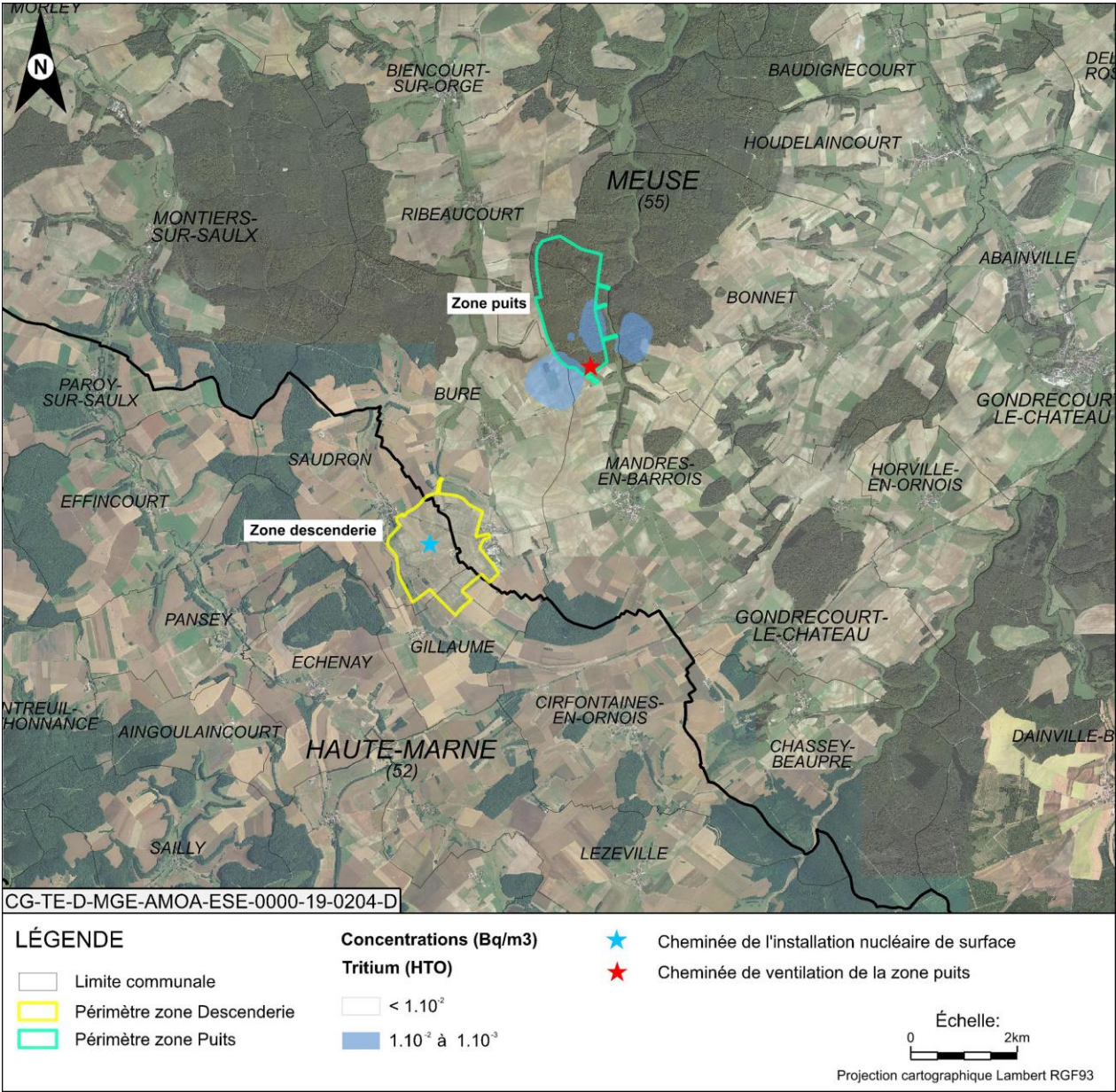


Figure 3-17

Illustration de l'évaluation des concentrations dans l'air du tritium associé aux rejets du centre de stockage Cigéo

Tableau 3-4

Concentrations dans l'air et dépôts annuels au sol des éléments radioactifs 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	3 mBq/m ³	300 Bq/m ² /an au maximum si le tritium est considéré entièrement sous forme de vapeur d'eau tritiée sinon pas de dépôt sous forme gazeuse (hydrogène tritié)
¹⁴ C	2 mBq/m ³	Sans objet (pas de dépôt pour les gaz)
⁸⁵ Kr	50 mBq/m ³	Sans objet (pas de dépôt pour les gaz)
Émetteurs beta	< nanoBq/m ³	< 0,0001 Bq/m ² /an
Émetteurs alpha	< nanoBq/m ³	< 0,00001 Bq/m ² /an

» DÉFINITION DU NANO

Nano (symbole n) est le préfixe du Système international d'unités (SI) qui représente 10⁻⁹, soit un milliardième d'unité.

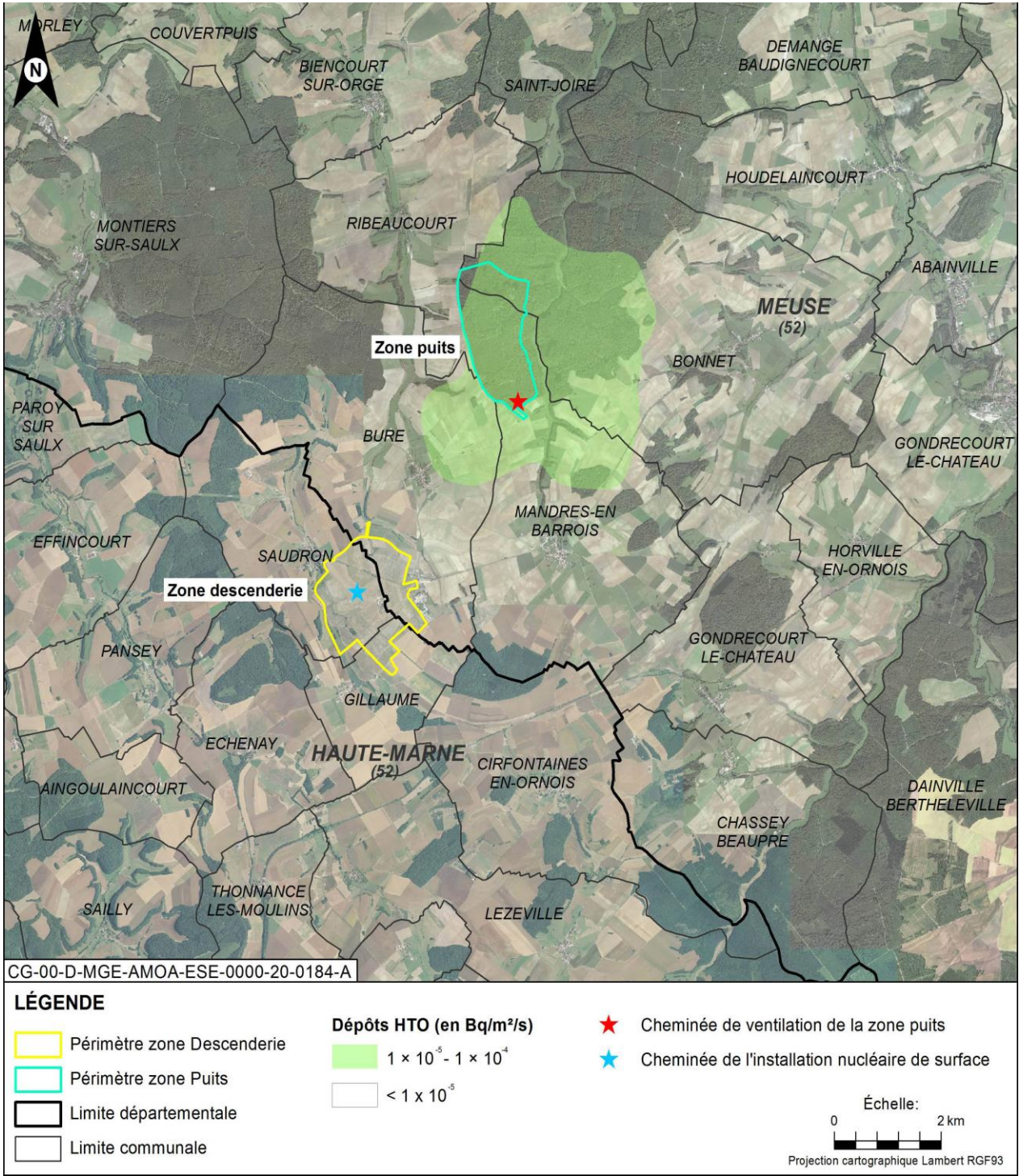


Figure 3-18 Illustration de l'évaluation des dépôts au sol de tritium associés aux rejets du centre de stockage Cigéo

Les concentrations calculées sont maximales au niveau du village de Bure (populations les plus exposées, cf. Chapitre 3.3.3.1 du présent volume de l'étude d'impact) pour l'ensemble des éléments radioactifs rejetés. Elles sont restituées dans le tableau 3-4 ci-après.

3.3.2.3 Les transferts des éléments radioactifs dans l'environnement et la chaîne agro-alimentaire

Les éléments radioactifs 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 éléments radioactifs 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 3-19).

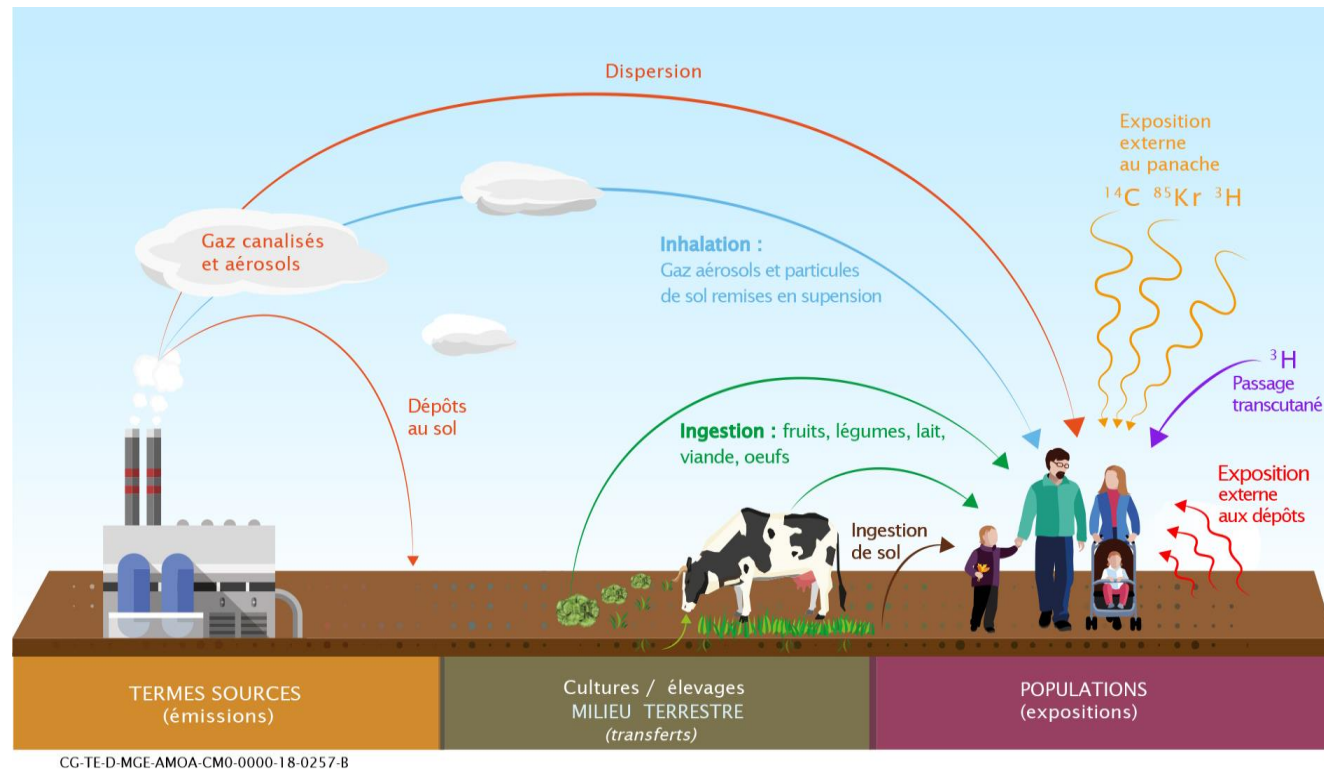


Figure 3-19 Schématisation du transfert des éléments radioactifs rejetés dans l'atmosphère

La concentration en éléments radioactifs 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).

L'homme, par inhalation d'air, contact avec le sol et ingestion de produits alimentaires issus de la culture ou de l'élevage, est donc susceptible d'être exposé aux émissions radioactives :

- soit de façon directe :
 - ✓ par exposition aux rayonnements ionisants des éléments radioactifs présents dans l'air (gaz et particules) ou les dépôts au sol ;
 - ✓ par inhalation de l'air contenant des éléments radioactifs (gaz et particules) ;
 - ✓ par inhalation ou ingestion par inadvertance de sol sur lequel se sont déposés des éléments radioactifs (particules) ;
 - ✓ par incorporation transcutanée de tritium.
- soit de façon indirecte :
 - ✓ par ingestion d'aliments (produits végétaux et animaux) dans lesquels sont présents des éléments radioactifs issus du transfert par voie atmosphérique sur leur ration alimentaire (céréales, herbe, foin).

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).

Ces différentes voies d'exposition sont schématisées sur la figure 3-20.

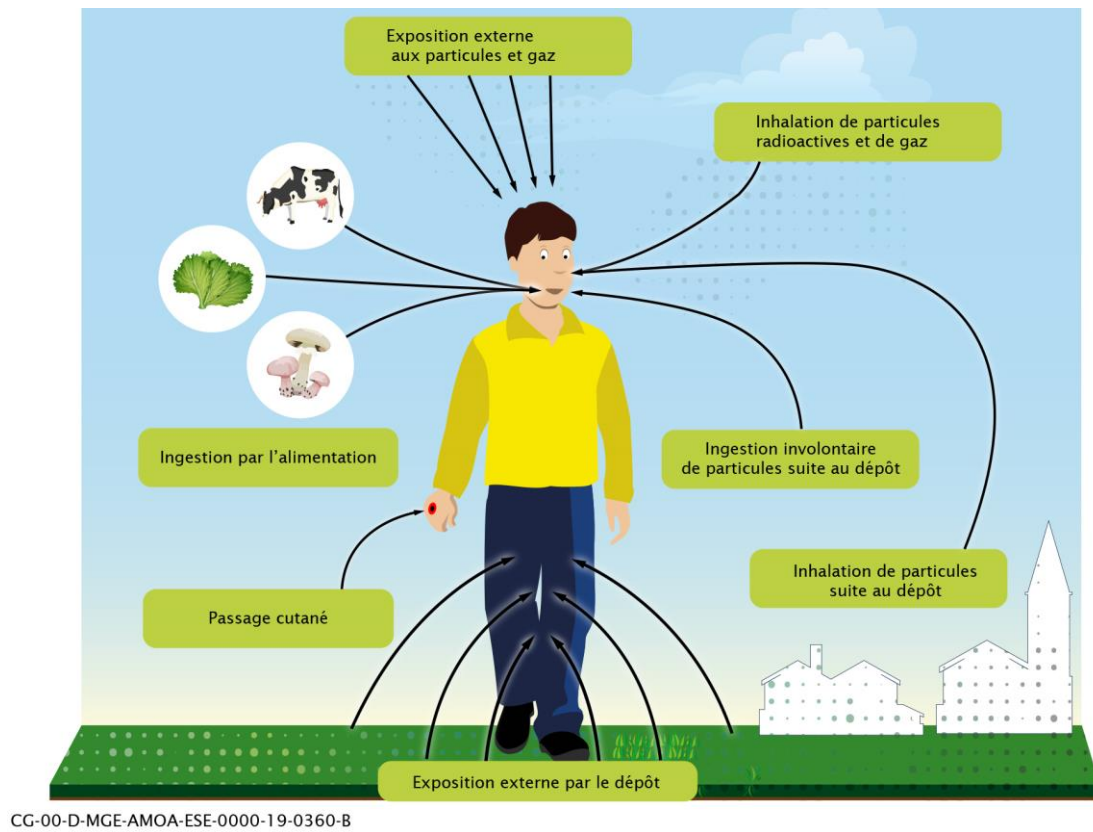


Figure 3-20 Schématisation des voies d'exposition à la radioactivité

L'évaluation de la dispersion des éléments radioactifs dans l'air, les sols et la chaîne alimentaire permet d'en déduire les concentrations ou activités associées à chaque élément radioactif, en Becquerels (Bq). 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. Le seuil de détection du tritium est de l'ordre de quelques Bq/L.

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

3.3.3 L'exposition humaine et les risques sur la santé humaine liés aux émissions radioactives

3.3.3.1 L'évaluation de l'exposition humaine liée aux émissions radioactives

Au regard des concentrations obtenues (cf. Chapitre 3.3.2.2 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'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 proviennent d'une enquête locale réalisée en 2013 sur le territoire de Meuse-Haute-Marne (42). 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).

3.3.3.2 Les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine liée aux émissions radioactives

Les résultats de l'évaluation de l'exposition humaine liée aux émissions radioactives du centre de stockage Cigéo à Bure sont restitués dans le tableau 3-5 ci-dessous.

Tableau 3-5 Doses efficaces reçues par la population liées aux émissions radioactives du centre de stockage Cigéo

Classes d'âges de la population	Doses efficaces engagées à Bure
Enfant de 1 à 2 ans	De l'ordre du µSv/an
Adolescent de 10 ans	De l'ordre du µSv/an
Adulte de plus de 17 ans	De l'ordre du µSv/an

» DÉFINITION DU MICRO

Micro (symbole µ) est le préfixe du Système international d'unités (SI) qui représente 10⁻⁶, soit un millionième d'unité.

Les doses efficaces engagées à Bure liées aux émissions radioactives du centre de stockage Cigéo sont plus de mille fois inférieures au mSv, de l'ordre du µSv quelle que soit la classe d'âge de la population.

Ces doses sont liées à l'ingestion d'aliments locaux (contribution de l'ordre 90 %) dans lesquels sont présents du carbone 14 (¹⁴C). Le carbone14 et le tritium étant très mobiles, ils ne s'accumulent pas ou très peu dans le sol et les différents compartiments de l'environnement. 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 3-6 ci-après.

Tableau 3-6 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 < µSv/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.

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 (négligeable par rapport à celle liée aux installations du centre de stockage Cigéo).

3.3.3.3 L'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 (code de la santé publique) fixe une limite annuelle d'exposition de l'homme contre les dangers des rayonnements ionisants à 1 mSv.an⁻¹ (dose efficace maximale admissible résultant des activités humaines en dehors de la radioactivité naturelle).

L'exposition humaine liée aux émissions du projet global Cigéo étant au maximum de l'ordre du µSv pendant la phase de fonctionnement, elle est largement inférieure à la contrainte réglementaire (cf. Figure 3-21). 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 à 1,6 mSv.an⁻¹).

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 nucléaire 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.

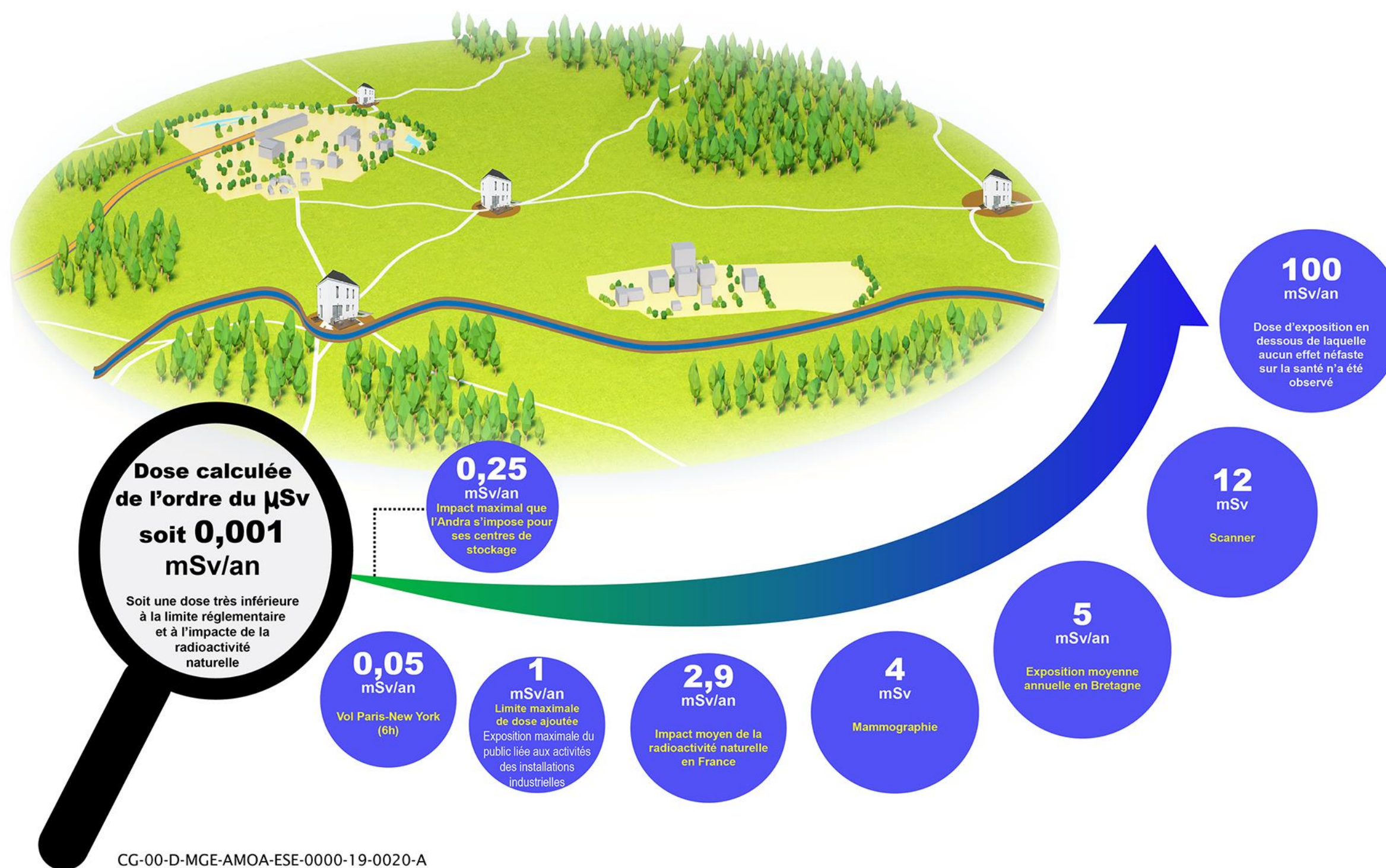


Figure 3-21

Valeurs repères d'exposition humaine 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. De même, les frontières avec la Belgique, le Luxembourg ou l'Allemagne étant situées à plus de 100 km, il n'a pas d'effet transfrontalier.

Pour rappel, le centre de stockage Cigéo ne rejette pas d'effluents liquides issus des zones à production possible de déchets nucléaires dans l'environnement local. Ces effluents liquides, avec des niveaux de radioactivité très faibles, sont transférées vers une installation nucléaire ou classée pour la protection de l'environnement en mesure de les prendre en charge, avec des moyens de transports fiables et résistants aux accidents.

Une fois le centre de stockage ayant eu l'autorisation d'être définitivement fermé, les déchets radioactifs seront isolés de l'homme et de l'environnement, notamment grâce à la couche du Callovo-Oxfordien, située à environ 500 m de profondeur et âgée d'environ 160 millions d'années, qui constitue une barrière naturelle entre le stockage et l'environnement de surface. L'essentiel des éléments radioactifs restent piégés dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage. Seuls quelques éléments radioactifs solubles, non retenus par l'argile et à vie longue (comme l'¹²⁹I, le ³⁶Cl et le ⁷⁹Se) migreront dans la couche du Callovo-Oxfordien par diffusion donc de manière très lente et limitée. Cela prendra à minima plusieurs centaines de milliers d'années. L'évaluation du risque sanitaire et des incidences résiduelles est réalisée en décrivant l'évolution du stockage et de son environnement géologique dans le temps. Cette évaluation se fonde sur une description à long terme du comportement des colis de stockage et des phénomènes qui régissent la migration des éléments radioactifs dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien et, pour ceux, mobiles à vie longue, leur migration vers des exutoires (lieux de prélèvement possibles d'eau). Pour ces quelques éléments mobiles, l'exposition humaine après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, estimée sous forme de doses, est appréciée de manière prudente et pénalisante, sur la base de l'état des connaissances et des incertitudes, en supposant que les humains du futur viendraient notamment utiliser les eaux des aquifères (par forages) pour leurs activités (cf. chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact). Dans le cadre de l'itération de sûreté/conception/connaissances (cf. chapitre 2.4.1 du volume II de la présente étude d'impact) réalisée au stade des options de sûreté, l'incidence exprimée en termes de dose à l'homme est évaluée sur une période d'un million d'années. Cette incidence concerne les quelques éléments radioactifs, ceux mobiles à vie longue (¹²⁹I, ³⁶Cl, ⁷⁹Se), qui sortent de la Couche du Callovo-Oxfordien de manière lente et limitée par diffusion. En supposant que une fois sortis de cette couche, ils arrivent en surface par différents exutoires notamment par pompage, l'incidence maximale associée à l'évolution normale du stockage se situe au-delà d'une centaine de milliers d'années au stade des options de sûreté et est inférieure à 0,02 mSv/an et à la contrainte de dose fixée par le guide de sûreté de l'ASN de 2008 (43). Cette évaluation fera l'objet d'une mise à jour dans le cadre de l'itération de sûreté/conception/connaissances en vue de la demande d'autorisation de création (DAC).

Par ailleurs, les niveaux d'exposition des populations des villages voisins suite à un accident ou une catastrophe majeure (cf. Chapitre 17 du volume IV de la présente étude d'impact) restent inférieurs à la limite réglementaire de dose efficace maximale admissible résultant des activités humaines en dehors de la radioactivité naturelle et des doses reçues en médecine (1 mSv/an) dans la plupart des cas, et peut atteindre quelques mSv dans des cas extrêmes. Ces niveaux d'exposition restent inférieurs à la dose repère des pouvoirs publics pour décider en cas d'accident, et au cas par cas, de la mise à l'abri des populations qui est de 10 mSv.

3.3.4 L'appréciation des incidences résiduelles sur la santé humaine liées aux émissions radioactives

Les expositions aux émissions radioactives du projet global sont toutes à des niveaux largement inférieurs aux objectifs fixés et aux valeurs limites pour la protection de la santé humaine.

Les incidences résiduelles des émissions radioactives du projet global Cigéo sont très faibles.

3.4 Synthèse des incidences liées aux émissions radioactives sur la santé humaine

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 vers le centre de stockage Cigéo puis transférés au sein des installations jusqu'aux alvéoles de stockage dans la formation 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 pour être stockés en souterrain.

Les sources d'émissions radioactives du projet global identifiées sont liées aux relâchements de quelques éléments radioactifs gazeux (tritium, ¹⁴C, ⁸⁵Kr) par certains colis de déchets MA-VL, la présence potentielle d'éléments radioactifs sur les surfaces externes des colis de déchets qui sont réceptionnés et la récupération possible d'effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires du centre de stockage, relevant de la réglementation Installation nucléaire de base (INB).

Les éléments radioactifs émettent des rayonnements dont la dangerosité dépend de la nature et du niveau de radioactivité. L'évaluation des effets sur l'homme se fait à l'échelle de sa vie entière, via le calcul d'une « dose efficace engagée », exprimée en Sievert (Sv).

Pour rappel, la radioactivité est un phénomène qui existe à l'état naturel depuis l'origine de l'univers (il y a 4,5 milliards d'années) lorsque les atomes se sont formés. 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 (avec une fourchette basse à 1,6 mSv pour les communes à faible teneur en radon, à faible niveau de rayonnements telluriques et peu touchées par les retombées anciennes, ainsi que pour des individus consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et ne fumant pas).

Les émissions radioactives des colis de déchets ont des incidences potentielles notables, elles font l'objet de mesures d'évitement et de réduction dans le cadre de la conception du projet global Cigéo.

Les effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires

Aucun procédé sur le centre de stockage de Cigéo ne génère d'effluents radioactifs liquides en fonctionnement normal. En effet, il n'y a aucune opération de traitement ou de conditionnement de déchets radioactifs sur le centre, et les colis de déchets radioactifs réceptionnés ne sont pas ouverts. Par précaution, toutes les eaux récupérées dans les zones dites « à production possible de déchets nucléaires », comme les condensats collectés en pied de cheminée des émissaires de la ventilation nucléaire, les eaux de ruissellement collectées au niveau des alvéoles dédiées aux colis de déchets HA et les éventuelles eaux d'extinction incendie dans les zones nucléaires, font l'objet d'une gestion séparée. Elles sont considérées comme des effluents susceptibles d'être contaminés par la présence d'éléments radioactifs.

Le niveau de radioactivité des effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires est extrêmement faible, de l'ordre du Becquerel par litre (Bq/L). À titre de comparaison, le niveau de radioactivité naturelle de l'eau de pluie est d'environ 1 Bq/L. Les incidences potentielles des effluents issus des zones à productions possible de déchets nucléaires sur la santé humaine ne sont pas notables.

Sur le centre de stockage, les effluents issus des zones à production possible de déchets nucléaires sont collectés au plus près de leur zone de production, contrôlés et stockés dans des cuves, protégées des agressions et équipées de rétentions étanches pour palier à une éventuelle fuite.

L'Andra s'engage à ne pas les rejeter dans l'environnement local. Aussi, ces cuves sont ensuite transférées vers une installation nucléaire ou classée pour la protection de l'environnement, localisée en France, en mesure de les prendre en charge sans incidence notable sur son environnement. Leur transport est soumis à la réglementation transport de matières dangereuses comme pour les colis de déchets radioactifs.

Le centre de stockage Cigéo ne rejette donc pas d'effluents liquides issus des zones à production possible de déchets nucléaires dans l'environnement local.

Les émissions radioactives atmosphériques

Les éléments radioactifs gazeux qui proviennent de certains colis de déchets sont le tritium (³H), le (carbone 14 (¹⁴C) et le krypton 85 (⁸⁵Kr). Ces trois éléments radioactifs sont très volatils, restent à l'état gazeux ou sous forme de vapeur d'eau, sans former d'aérosols. Ils sont également faiblement radiotoxiques. Les aérosols radioactifs (émetteurs alpha et bêta) pouvant être présents sur la surface externe des colis de déchets radioactifs (aussi appelée contamination surfacique labile) peuvent être mis en suspension lors de la manutention des colis de déchets.

Les mesures 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 éléments radioactifs. Il s'agit notamment :

- du conditionnement définitif des déchets radioactifs (solidifiés et immobilisés dans une matrice puis placés dans un conteneur), sur les sites des producteurs, et selon les spécifications d'acceptation fixées par l'Andra ;
- de la conception robuste des emballages de transport, sous la responsabilité de l'expéditeur (producteurs), et leur contrôle ;
- de la conception des installations du centre de stockage Cigéo, avec :
 - ✓ des ouvrages de génie civil conçus pour assurer une protection radiologique contre les rayonnements ionisants ;
 - ✓ des systèmes de ventilation dédiés à la gestion des émissions radioactives comprenant une canalisation des émissions au sein des installations jusqu'à des émissaires, appelés « cheminées », permettant leur surveillance, un système de filtration à très haute efficacité permettant de retenir la majeure partie des aérosols radioactifs) et une hauteur des émissaires de rejets (cheminées) favorisant la dispersion.

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, une consommation de produits issus de l'agriculture et de l'élevage locaux...) ;
- 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 beta assimilés à des éléments radioactifs pénalisants, en considérant plusieurs classes d'âges de population plus sensibles...).

Les populations 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, 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 pour de nombreuses installations nucléaires de base et dont 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.

L'exposition humaine maximale liée aux émissions radioactives atmosphériques est extrêmement faible, de l'ordre du µSv/an (plus de mille fois inférieure au mSv) au niveau du village de Bure. L'exposition humaine pour les autres villages environnants est encore plus faible (entre 20 % et 40 % de l'exposition à Bure, dans un rayon d'environ 8 km). 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.

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. 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 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, et non pas d'effet transfrontalier.

Une fois le centre de stockage ayant eu l'autorisation d'être définitivement fermé (cf. Chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact), l'ensemble de l'installation souterraine (y compris les liaisons surface-fond) aura été remblayé et l'installation nucléaire de surface aura été démantelée. Les activités en surface seront fortement réduites, essentiellement liées à la surveillance du site et de l'environnement. Les déchets radioactifs seront isolés de l'homme et de l'environnement, notamment grâce à la couche du Callovo-Oxfordien, située à environ 500 m de profondeur et âgée d'environ 160 millions d'années, qui constitue une barrière naturelle entre le stockage et l'environnement de surface. L'essentiel des éléments radioactifs restent piégés dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage et seuls quelques éléments radioactifs solubles, non retenus par l'argile et à vie longue (comme l'¹²⁹I, le ³⁶Cl et le ⁷⁹Se) migreront dans la couche du Callovo-Oxfordien par diffusion de manière très lente et limitée. Cela prendra à minima plusieurs centaines de milliers d'années. Pour ces quelques éléments mobiles, le risque sanitaire (et incidence sur la santé humaine) après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo est apprécié de manière prudente et pénalisante, sur la base de l'état des connaissances et des incertitudes, en supposant que les humains du futur viendraient notamment utiliser les eaux des aquifères (prélèvements d'eau par forages) pour leurs activités. Dans le cadre de l'itération de sûreté/conception/connaissances (cf. Chapitre 2.4.1 du volume II de la présente étude d'impact) réalisée au stade des options de sûreté, l'incidence maximale associée à l'évolution normale du stockage se situe au-delà d'une centaine de milliers d'années. Elle est inférieure à 0,02 mSv/an et à la contrainte de dose fixée par le guide de sûreté de l'ASN de 2008 (43). Cette évaluation fera l'objet d'une mise à jour dans le cadre de l'itération de sûreté/conception/connaissance en vue de la demande d'autorisation de création (DAC).

Les émissions radioactives atmosphériques du projet global Cigéo ont une incidence très faible sur la santé humaine.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1	Échelle des niveaux sonores perçus	8
Figure 1-2	Schématisation des champs électriques et magnétiques	10
Figure 1-3	Illustration de valeurs des champs électriques et magnétiques émis par des appareils et installations de la vie quotidienne	10
Figure 1-4	Illustration des opérations de raccordement sur la ligne électrique 400 kV	11
Figure 1-5	Exemple de convoyeur à bande en caisson béton	13
Figure 1-6	Population présente dans la partie sud de l'aire d'étude immédiate	14
Figure 1-7	Population présente dans la partie nord de l'aire d'étude immédiate	14
Figure 2-1	Photographie illustrative de refroidisseurs à circuit fermé	25
Figure 2-2	Vue de l'ancienne plateforme ferroviaire et du terrain industriel de Gondrecourt-le-Château	26
Figure 2-3	Vue de l'arrosage de pistes pour limiter l'envol de poussières par temps sec	26
Figure 2-4	Localisation des sources d'émissions atmosphériques en phase de fonctionnement	28
Figure 2-5	Schématisation des voies d'exposition des populations aux émissions chimiques du projet global Cigéo	31
Figure 3-1	Illustration des trois types de rayonnements ionisants	36
Figure 3-2	Illustration de l'effet de la radioactivité : du becquerel (Bq) au sievert (Sv)	37
Figure 3-3	Illustration des types d'exposition à la radioactivité	37
Figure 3-4	Illustration du passage de la dose absorbée à la dose efficace engagée	38
Figure 3-5	Contributions à une dose liée au bruit de fond radiologique français (fourchette basse de 1,6 mSv/an)	39
Figure 3-6	Photographie d'emballages de transport de déchets radioactifs sur un train	40
Figure 3-7	Exemples de colis de déchets radioactifs HA (à gauche) et MA-VL (à droite)	41
Figure 3-8	Photographie illustrant le contrôle d'un emballage de transport	42
Figure 3-9	Localisation des ouvrages et installations de la zone descendrière	42
Figure 3-10	Illustration d'un contrôle de colis primaire au sein de l'installation nucléaire de surface du centre de stockage Cigéo	43
Figure 3-11	Démarche d'évaluation de l'exposition humaine et du risque sanitaire liée aux émissions radioactives	43
Figure 3-12	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	44
Figure 3-13	Localisation des émissaires de rejets atmosphériques radioactifs du centre de stockage Cigéo	45
Figure 3-14	Illustration de la modélisation de la dispersion atmosphérique des gaz et aérosols rejetés par une installation	47
Figure 3-15	Photographie de la station atmosphérique d'Houdelaincourt	48
Figure 3-16	Roses des vents générales par classe de vitesse à la station atmosphérique d'Houdelaincourt (2011-2017)	48
Figure 3-17	Illustration de l'évaluation des concentrations dans l'air du tritium associé aux rejets du centre de stockage Cigéo	49
Figure 3-18	Illustration de l'évaluation des dépôts au sol de tritium associés aux rejets du centre de stockage Cigéo	50
Figure 3-19	Schématisation du transfert des éléments radioactifs rejetés dans l'atmosphère	51
Figure 3-20	Schématisation des voies d'exposition à la radioactivité	51
Figure 3-21	Valeurs repères d'exposition humaine aux émissions radioactives	53

Tableaux

Tableau 1-1	Champs électriques et magnétiques pour une tension de 400 kV	16
Tableau 1-2	Valeurs moyennes et maximales des champs magnétiques pour une tension de 90 kV, comparées à la limite réglementaire	16
Tableau 2-1	Correspondances entre les étapes de la démarche d'évaluation des risques sanitaire de l'INERIS et leur restitution dans la présente étude d'impact	20
Tableau 2-2	Caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques présents dans les émissions liquides du projet global Cigéo	21
Tableau 2-3	Caractéristiques et effets potentiels des composés chimiques contenus dans les émissions atmosphériques du projet global Cigéo	24
Tableau 2-4	Localisation des effluents conventionnels du centre de stockage Cigéo	27
Tableau 2-5	Localisation des sources d'émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo en phase de fonctionnement	27
Tableau 2-6	Liste des substances d'intérêt des émissions atmosphériques du projet global Cigéo	29
Tableau 2-7	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	29
Tableau 2-8	Valeurs toxicologiques de référence pour des expositions par inhalation	30
Tableau 2-9	Valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles pour les substances d'intérêt retenues pour l'évaluation des incidences liées aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo	30
Tableau 2-10	Exposition humaine annuelle liée aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo, bruit de fond et valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles associées	31
Tableau 2-11	Exposition humaine journalière liée aux émissions chimiques atmosphériques du projet global Cigéo, bruit de fond et valeurs de référence réglementaires ou de gestion disponibles associées	32
Tableau 2-12	Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo lié au benzène (substance d'intérêt des composés organiques volatils)	33
Tableau 2-13	Analyse du risque sanitaire du projet global Cigéo lié au monoxyde de Carbone	33
Tableau 3-1	Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation nucléaire de surface du centre de stockage Cigéo	45
Tableau 3-2	Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo	45
Tableau 3-3	Comparaison des rejets atmosphériques du centre de stockage Cigéo avec d'autres installations nucléaires de base françaises	46
Tableau 3-4	Concentrations dans l'air et dépôts annuels au sol des éléments radioactifs émis par le centre de stockage Cigéo en phase de fonctionnement, au niveau du village de Bure	50
Tableau 3-5	Doses efficaces reçues par la population liées aux émissions radioactives du centre de stockage Cigéo	52
Tableau 3-6	Proportion de la dose reçue par la population des autres villages par rapport à celle de Bure	52

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. Version consolidée au 21 octobre 2019 (2019).
- 2 Le principe de proportionnalité dans l'évaluation environnementale. Ministère de la transition écologique et solidaire (2019). Disponible à l'adresse : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-33914-evaluation-environnementale-principe-proportionnalite.pdf>.
- 3 Bruit & Santé : Effets biologiques et sanitaires du bruit - Comment lutter contre le bruit ? AFSSET (2007). Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2003et1000Sy.pdf>.
- 4 Environmental noise guidelines for the European Region. World Health Organization (2018). 181 p. Disponible à l'adresse : http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf?ua=1.
- 5 Arrêté du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique (2020). Journal officiel de la République française, N°ECOI0100130A.
- 6 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). AFNOR, ISO (2014), NF ISO 2631-2.
- 7 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 (2018).
- 8 Research on Power-Frequency Fields Completed Under the Energy Policy Act of 1992. National Academic Press (1999). ISBN : 978-0-585-10273-3.
- 9 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. BMJ (2005). Vol 330, N°7503, pp.1290.
- 10 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.1402-8.
- 11 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.1370-4.
- 12 Champs électromagnétiques et santé publique. Exposition aux champs de fréquence extrêmement basse. OMS (2007). 322. 5 p.
- 13 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, N°L199, pp.59-70.
- 14 Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières. Ministère de l'environnement (1994). Journal officiel de la République française, N°246, pp.15041-4.
- 15 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. AFNOR (2014), NF C99-133-1 ; NF EN 61786-1.
- 16 Champs électriques et magnétiques générés par les systèmes d'alimentation à courant alternatif - Procédures de mesure des niveaux l'exposition du public. CEI (2009), CEI 62110.
- 17 Protocole pour la mesure in situ des champs magnétiques 50 Hz générés par les ouvrages de transport d'électricité. UTE (2010), UTE C 99 132.
- 18 Guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact. Institut de veille sanitaire (InVS) (2000). 49 p. Disponible à l'adresse : https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/guide_pour_l_analyse_du_volet_sanitaire_des_etudes_d_impact.pdf.
- 19 Grammont, V., Boudet, C. Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires liés aux émissions chimiques émises par les installations classées. Impact des activités humaines sur les milieux et la santé sur les milieux et la santé. INERIS (2013). DRC - 12 - 125929 - 13162B. 102 p. Disponible à l'adresse : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Ineris-DRC-12-12592-13162B-Evaluation-de-l-Etat-des-milieux-et-des-risques-sanitaires.pdf>.
- 20 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 (2019).
- 21 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. Ministère de la santé et des solidarités (2017).
- 22 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 (1998). Journal officiel des Communautés européennes, N°L 350, pp.58-68.
- 23 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; Direction générale de la santé (2014).
- 24 Dossier de validation du logiciel ARIA Impact. ARIA Technologies (2009). ARIA/2007 105. 29 p.
- 25 Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA 006) Omega 12. Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul). INERIS (2002). INERIS DRA 2002 25427. Disponible à l'adresse : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/46web.pdf>.
- 26 Bilan de la surveillance de la Polynésie française en 2012. Synthèse des résultats du réseau de surveillance de l'IRSN. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2013). PRP ENV SESURE 2013 34. 29 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsln.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN_Surveillance-Polynesie-2012_SESURE-2013-34.pdf.
- 27 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). DG/ 2018-00006. 354 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsln.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN-ENV_Bilan-Radiologique-France-2015-2017.pdf.
- 28 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); ACTA (2012). IRSN/2019-00318. 100 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsln.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN_Guide-ACTA_2012.pdf.
- 29 Eckerman, K.-F., Ryman, J.-C. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. United States Environmental Protection Agency (EPA) (1993). EPA 402-R-93-081. Disponible à l'adresse : <https://www.epa.gov/radiation/federal-guidance-report-no-12-external-exposure-radionuclides-air-water-and-soil>.
- 30 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. Ministère de la santé, de

- la famille et des personnes handicapées (2003). Journal officiel de la République française, N°262, pp.58003-68.
- 31 ICRP Publication 71 : Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides. Part 4 : Inhalation dose coefficients. Annals of the ICRP (1996). Pergamon Press; ICRP. Vol 25, N°3-4, 405 p.
 - 32 Regulation for the safe transport of radioactive material (2012 edition). IAEA (2012). SSR-6. 191 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1570_web.pdf.
 - 33 Arrêté du 29 mai 2009 relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (dit "arrêté TMD") (2009). Journal officiel de la République française, N°147, pp.10735.
 - 34 Arrêté du 9 août 2013 portant homologation de la décision n° 2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2013). Journal officiel de la République française, N°193, pp.14278.
 - 35 Arrêté du 8 janvier 2007 modifiant l'arrêté du 10 janvier 2003 autorisant la Compagnie générale des matières nucléaires à poursuivre les prélèvements d'eau et les rejets d'effluents liquides et gazeux pour l'exploitation du site nucléaire de La Hague (2007). Journal officiel de la République française.
 - 36 Arrêté du 29 décembre 2004 fixant les modèles des statuts des caisses primaires d'assurance maladie (2004). Journal officiel de la République française.
 - 37 Arrêté du 21 septembre 2017 portant homologation de la décision n° 2017-DC-0596 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 juillet 2017 fixant les limites de rejet dans l'environnement des effluents des installations nucléaires de base civiles du centre de Cadarache exploitées par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) sur la commune de Saint-Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône (2017). Journal officiel de la République française.
 - 38 Arrêté du 21 août 2006 autorisant l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) à effectuer des rejets d'effluents liquides et gazeux et des prélèvements d'eau pour le centre de stockage de l'Aube (installation nucléaire de base n°149). Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (2006). Journal officiel de la République française, N°217, pp.13722.
 - 39 Décision n°2014-DC-0443 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 15 juillet 2014 fixant les limites de rejets dans l'environnement des effluents liquides et gazeux des installations nucléaires de base n° 45, 78, 89 et 173 exploitées par Électricité de France – Société Anonyme (EDF-SA) dans la commune de Saint-Vulbas (département de l'Ain). Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2014).
 - 40 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. CEA (2011). SIM SCGCI RBC NT 11000608 A. 48 p.
 - 41 Monfort, M., Lambert Wentzler, L., Patryl, L., Armand, P. Présentation de la plate-forme CERES destinée à l'évaluation des conséquences sanitaires des rejets de polluants dans l'environnement. Radioprotection (2019). Vol 54, N°3, pp.195-201.
 - 42 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.185-92.
 - 43 Rieu, J., Niel, J.-C., Bodenez, P. Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008). 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/guide_RFSIII_2_fv1_2_.





© Andra • 2021 • Création graphique : Agence Les Récréateurs • Crédits photos : Andra



AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00
www.andra.fr

