

15 JUIN 2026



MÉTHODE D'APPRÉCIATION DE LA NOCIVITÉ DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

PRÉSENTATION DES CHOIX MÉTHODOLOGIQUES

GROUPE DE TRAVAIL RESTREINT NOCIVITÉ



LE GROUPE DE TRAVAIL RESTREINT NOCIVITÉ

Ce livrable synthétise les réflexions collectives du groupe de travail restreint Nocivité (GT Restreint). Piloté par l'Andra, ce groupe rassemble des représentants des principaux producteurs de déchets radioactifs (CEA, EDF, Orano) ainsi que de l'ASNR.

Ce groupe se réunit à l'initiative de l'Andra depuis octobre 2022 et a pour objectif de proposer une méthode d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs, en réponse à la demande ENV.2 du PNGMDR 2022-2026.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION ET CONTEXTE	6
1.1	ORIGINE DES TRAVAUX RELATIFS A L'APPRECIATION DE LA NOCIVITE	6
1.2	CONTEXTE DU PNGMDR 2022-2026	7
1.3	ETUDES ENGAGEES DEPUIS 2023 AU TRAVERS DE DEUX GROUPES DE TRAVAIL COMPLEMENTAIRES	8
2.	OBJET DU RAPPORT	9
3.	CHOIX METHODOLOGIQUES STRUCTURANT LA DEMARCHE D'APPRECIATION DE LA NOCIVITE	10
3.1	LIEN ENTRE L'INDICATEUR DE NOCIVITE ET LES FICHES DESCRIPTIVES DES FAMILLES DE L'INVENTAIRE NATIONAL	10
3.2	APPRECIATION DE LA NOCIVITE INTRINSEQUE	11
3.3	L'OBJET D'ETUDE : LE COLIS DE DECHETS RADIOACTIFS	13
3.4	BILAN DES CHOIX STRUCTURANTS REALISES	14
4.	DEFINITION DES SOUS-INDICATEURS DE NOCIVITE	15
4.1	PRINCIPES ASSOCIES A LA DEFINITION DES SOUS-INDICATEURS DE NOCIVITE	15
4.2	APPRECIATION DE LA NOCIVITE VIS-A-VIS DE L'ETRE HUMAIN.....	17
4.3	APPRECIATION DE LA NOCIVITE VIS-A-VIS DE LA FAUNE/FLORE	21
4.4	EXEMPLES D'APPLICATION.....	23
4.5	BILAN DES SOUS-INDICATEURS RETENUS.....	32
5.	DEFINITION DE L'ECHELLE DE GRADATION DE LA NOCIVITE	35
5.1	LES PRINCIPES DE CONSTRUCTION DE L'ECHELLE DE GRADATION DE LA NOCIVITE.....	35
5.2	PRESENTATION DES ECHELLES DE GRADATION DES NOCIVITES RADIOLOGIQUE ET CHIMIQUE	37
5.3	EXEMPLES D'APPLICATION.....	38
6.	ENJEUX DE REPRESENTATION DE L'INDICATEUR.....	40
6.1	PRINCIPES POUR LA CONCEPTION D'UN INDICATEUR ET APPLICATION A LA NOCIVITE	40
6.2	LES PROTOTYPES D'INDICATEUR DE NOCIVITE A PARTAGER AU GT PLURALISTE	41
6.3	QUESTIONNEMENTS ASSOCIES AUX DEUX PROTOTYPES D'INDICATEURS	44
7.	LIMITES DE L'APPROCHE ET PERSPECTIVES DE TRAVAIL.....	45
7.1	LES LIMITES ACTUELLES DE L'APPROCHE.....	45
7.2	PERSPECTIVES ENVISAGEES EN CAS DE POURSUITE DES TRAVAUX SUR L'APPRECIATION DE LA NOCIVITE DES MATIERES ET DECHETS RADIOACTIFS.....	48
7.3	VERS UNE MEILLEURE APPRECIATION DES NOCIVITES RADIOLOGIQUE ET CHIMIQUE : UN ENJEU QUI DEPASSE LE CADRE DU GT RESTREINT	49
8.	CONCLUSION	50
9.	REFERENCES	52
10.	ANNEXE - RESULTATS COMPLEMENTAIRES ASSOCIES AU CHOIX DU COLIS DE DECHETS RADIOACTIFS COMME OBJET D'ETUDE	53

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°1 – IRRADIATION AU CONTACT A T0	24
FIGURE 2 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°2 - RADIOTOXICITE INTERNE PAR INGESTION A T0	24
FIGURE 3 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°3 - RADIOTOXICITE INTERNE PAR INHALATION A T0	25
FIGURE 4 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA RADIOTOXICITE INTERNE PAR INGESTION	26
FIGURE 5 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA RADIOTOXICITE INTERNE PAR INHALATION	26
FIGURE 6 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°4 - CHIMIOTOXICITE A SEUIL PAR INGESTION	27
FIGURE 7 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°5 - CHIMIOTOXICITE SANS SEUIL PAR INGESTION	28
FIGURE 8 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°6 - CHIMIOTOXICITE A SEUIL PAR INHALATION	28
FIGURE 9 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°7 – CHIMIOTOXICITE SANS SEUIL PAR INHALATION	29
FIGURE 10 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°8 – RADIOECOTOXICITE EXTERNE A T0	30
FIGURE 11 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°9 – RADIOECOTOXICITE INTERNE A T0	30
FIGURE 12 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA RADIOECOTOXICITE EXTERNE	31
FIGURE 13 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA RADIOECOTOXICITE INTERNE	31
FIGURE 14 : RESULTATS ASSOCIES AU SOUS-INDICATEUR N°10 – CHIMIO-ECOTOXICITE	32
FIGURE 15 : PRINCIPE GENERAL DU PROTOTYPE 1	42
FIGURE 16 : DECLINAISONS POSSIBLES DU PROTOTYPE 1	42
FIGURE 17 : PRINCIPE GENERAL DU PROTOTYPE 2	43
FIGURE 18 : DECLINAISONS POSSIBLES DU PROTOTYPE 2	43
FIGURE 19 : RADIOTOXICITE INTERNE PAR INGESTION CALCULEE SELON DIFFERENTES CONFIGURATIONS ("DECHET PUR", "BLOC DECHET", "COLIS DANS SON ENSEMBLE")	54
FIGURE 20 : RADIOTOXICITE INTERNE PAR INHALATION CALCULEE SELON DIFFERENTES CONFIGURATIONS ("DECHET PUR", "BLOC DECHET", "COLIS DANS SON ENSEMBLE")	54
FIGURE 21 : CHIMIOTOXICITE A SEUIL PAR INGESTION CALCULEE SELON DIFFERENTES CONFIGURATIONS ("DECHET PUR", "BLOC DECHET", "COLIS DANS SON ENSEMBLE")	55
FIGURE 22 : CHIMIOTOXICITE A SEUIL PAR INHALATION CALCULEE SELON DIFFERENTES CONFIGURATIONS ("DECHET PUR", "BLOC DECHET", "COLIS DANS SON ENSEMBLE")	55
FIGURE 23 : CHIMIOTOXICITE A SEUIL PAR INGESTION EN INTEGRANT OU NON LES SUBSTANCES CHIMIQUES APPORTEES PAR LES ELEMENTS DE CONDITIONNEMENT	56
FIGURE 24 : CHIMIOTOXICITE A SEUIL PAR INHALATION EN INTEGRANT OU NON LES SUBSTANCES CHIMIQUES APPORTEES PAR LES ELEMENTS DE CONDITIONNEMENT	57

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : SITUATIONS D'EXPOSITION PRISES EN COMPTE POUR APPRECIER LA NOCIVITE RADIOLOGIQUE ET CHIMIQUE VIS-A-VIS DE L'ETRE HUMAIN	17
TABLEAU 2 : SITUATIONS D'EXPOSITION PRISES EN COMPTE POUR APPRECIER LA NOCIVITE RADIOLOGIQUE ET CHIMIQUE VIS-A-VIS DE LA FAUNE/FLORE	21
TABLEAU 3 : LISTE DES SOUS-INDICATEURS DE NOCIVITE	33
TABLEAU 4 : ECHELLE DE GRADATION DE LA NOCIVITE RADIOLOGIQUE AVEC X CORRESPONDANT AU NIVEAU DE NOCIVITE DES SOUS-INDICATEURS RADIOLOGIQUES NORMALISES AU COLIS THEORIQUE « MAX »	37
TABLEAU 5 : ECHELLE DE GRADATION DE LA NOCIVITE CHIMIQUE AVEC X CORRESPONDANT AU NIVEAU DE NOCIVITE DES SOUS-INDICATEURS CHIMIQUES NORMALISES AU COLIS THEORIQUE « MAX »	38
TABLEAU 6 : POSITIONNEMENT A T0 DES 9 COLIS RETENUS SUR LES ECHELLES DE GRADATION DE LA NOCIVITE RADIOLOGIQUE ET CHIMIQUE	39
TABLEAU 7 : POSITIONNEMENT A T0 + 10 000 ANS DES 9 COLIS RETENUS SUR LES ECHELLES DE GRADATION DE LA NOCIVITE RADIOLOGIQUE ET CHIMIQUE	39

Colis de déchets radioactifs : un colis de déchets est en général constitué de trois éléments à savoir un déchet radioactif, un matériau d'immobilisation (verre, béton, résine ou bitume) et le conteneur en métal, béton, plastique. Ce conditionnement vise à assurer la sûreté de la manutention, de l'entreposage, du transport et du stockage. Il est directement lié au type de déchets radioactifs qu'il renferme.

Danger : désigne toute source potentielle de dommage à l'égard d'un objet ou d'une substance, indépendamment des conditions d'exposition. Il se distingue en cela du risque, qui intègre la probabilité qu'un tel dommage se produise effectivement.

Diagramme de Kiviat : aussi appelé graphique en radar ou en toile d'araignée, il représente simultanément plusieurs variables sur des axes rayonnant depuis un même centre. Son intérêt est de présenter plusieurs données qui se lisent de façon indépendante les unes des autres et qui peuvent être facilement comparées.

Déchet radioactif : En application de l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement, les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée ou qui ont été requalifiées comme tels par l'autorité administrative en application de l'article L. 542-13-2.

Ecosystème : regroupe un ensemble fonctionnel d'êtres vivants et de leur environnement physique (eau, sol, air) qui interagissent entre eux et qui détiennent l'ensemble des propriétés requises pour assurer la continuité du vivant. Dans le contexte de ce rapport, l'écosystème aquatique a particulièrement été ciblé.

Effets à seuil : effets survenant au-delà d'une certaine dose, provoquant des dommages dont la gravité augmente avec la dose d'exposition. En dessous de cette dose, il n'y a pas d'effet sur la santé.

Effets sans seuil : effets qui peuvent apparaître quelle que soit la dose reçue. Il existe une probabilité d'apparition du danger quelle que soit la dose, d'où l'absence de seuil de dose/ Il est considéré que la probabilité de survenue d'un effet, le plus souvent cancérogène, croît avec la dose.

Être humain : considéré ici comme cible aux dangers évalués. Dans ce contexte, il est appréhendé comme un organisme biologique susceptible d'être affecté par des radionucléides ou substances chimiques par ingestion, inhalation ou irradiation, indépendamment de toute considération sociale ou comportementale.

Faune/Flore : La faune regroupe l'ensemble des espèces animales présentes dans un milieu donné, tandis que la flore intègre l'ensemble des espèces végétales. Dans ce rapport, ces deux composantes sont considérées comme cibles aux dangers associés aux radionucléides et substances chimiques.

Indicateur : outil construit pour rendre compte de manière simplifiée d'un phénomène complexe, afin d'en faciliter la compréhension et la communication. Il ne restitue pas l'intégralité de la réalité qu'il représente, mais en offre une image synthétique, utile à la prise de décision ou à l'information du public.

Intrinsèque : Ce qui relève de la nature propre d'un objet ou d'une substance, indépendamment des conditions extérieures dans lesquelles il se trouve.

Matière radioactive : Une matière radioactive est définie dans l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement comme « une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement ». Il s'agit pour l'essentiel d'uranium naturel extrait de la mine, d'uranium naturel enrichi, d'uranium appauvri, de combustibles (neufs, en cours d'utilisation, usés et rebuts), de plutonium séparé, d'uranium issu de retraitement des combustibles usés, de thorium et de matières en suspension.

Modalités de gestion des colis de déchets radioactifs : incluent l'ensemble des opérations visant à confiner et isoler les colis de déchets radioactifs de l'homme et de l'environnement. Ces modalités comprennent l'entreposage et le stockage des colis de déchets radioactifs.

Nocivité : caractère de ce qui est nocif, nuisible dangereux. Pour ce rapport, la nocivité désigne les caractéristiques intrinsèques d'une substance à altérer la santé de l'être humain et de la faune/flore. Elle est ainsi appréciée comme potentiel de danger, indépendamment des conditions réelles d'exposition.

Population : ensemble d'êtres humains. Dans ce contexte, il s'agit de l'ensemble des êtres humains susceptibles d'être exposés aux dangers associés aux colis de déchets radioactifs.

Risque : probabilité qu'un danger se concrétise en dommage réel, compte tenu des conditions effectives d'exposition.

Radionucléides : atome instable qui se désintègre naturellement pour retrouver sa stabilité en émettant un rayonnement ionisant et en donnant naissance à un autre atome. C'est cette émission qui confère aux déchets radioactifs leur potentiel de danger radiologique.

Situation d'exposition : situation qui, sur la base de scénario d'exposition standardisé, décrit les conditions dans lesquelles l'être humain ou la faune/flore sont susceptibles d'entrer en contact avec une substance dangereuse (e.g., par ingestion, inhalation, irradiation). Dans ce rapport, ces situations d'exposition sont définies par convention, indépendamment des conditions réelles d'exposition.

Substances chimiques : On entend par substances, les éléments chimiques et leurs composés tels qu'ils se présentent à l'état naturel. Dans le contexte du rapport, les substances chimiques étudiées sont celles susceptibles d'être présentes dans les colis de déchets radioactifs et aujourd'hui déclarées par les producteurs (e.g., substances métalliques, amiante).

Valeur Toxicologique de Référence (VTR) : Une VTR traduit la relation quantitative qui existe entre la concentration d'une substance chimique et la probabilité d'apparition d'un effet sanitaire liée à une exposition aiguë ou à une exposition chronique continue ou répétée dans le temps.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Ae : Autorité environnementale

Andra : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

ASNR : Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

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

CEPN : Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire

CIPR : Commission internationale de protection radiologique

CLP : Classification, étiquetage et emballage des substances et mélanges

DALY : Disability adjusted life years

DPE : Diagnostic de performance énergétique

EdF : Electricité de France

FA-VL : déchets de faible activité à vie longue

FMA-VC : déchets de faible et moyenne activité à vie courte

GPD : groupe permanent d'experts pour les déchets

HA : déchets de haute activité

Indice ATMO : indicateur journalier qualificatif de la qualité de l'air

Ineris : Institut national de l'environnement industriel et des risques

MA-VL : déchets de moyenne activité à vie longue

NA : non applicable

PNGMDR : plan national de gestion des matières et déchets radioactifs

TFA : déchets de très faible activité

VTR : Valeur Toxicologique de Référence

ZDC : zones à déchets conventionnels

ZppDN : zones à production possible de déchets nucléaires

1. Introduction et contexte

1.1 Origine des travaux relatifs à l'appréciation de la nocivité

En 2016, le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018 (PNGMDR 2016-2018) [1] fait l'objet, pour la première fois, d'une évaluation par l'Autorité environnementale (Ae) qui, dans son avis du 20 juillet 2016 [2], soulève notamment la question de la « *nocivité* » des matières et déchets radioactifs, en pointant ce qu'elle estime constituer différentes lacunes.

Plus précisément, l'Ae considère d'abord que l'information relative à la nocivité et son évolution dans le temps n'est pas disponible pour le public :

- « *En premier lieu, un lecteur non averti n'est pas en mesure de comparer la nocivité des matières radioactives et des déchets radioactifs* » ;
- « *les informations fournies ne permettent pas de disposer d'ordres de grandeur de la nocivité [des] déchets et de son évolution à court, moyen et long terme* ».

Par ailleurs, l'Ae note que l'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement prévoit que le PNGMDR respecte un certain nombre d'orientations, en particulier « *la réduction du volume et de la nocivité des déchets radioactifs [...] notamment par le traitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs* ». En revanche, elle constate que le Code de l'environnement ne définit pas clairement la nocivité des matières et déchets radioactifs. Elle y voit un manque qu'il conviendrait de combler :

- « *[...] ce que recouvre la nocivité des déchets n'est pas explicitée [dans le plan]* » ;
- « *pour l'Ae, ce concept de nocivité ne peut se réduire au seul potentiel de danger lié à la radioactivité des matières et des déchets radioactifs et devrait pleinement prendre en compte leurs impacts chimiques et écotoxicologiques, ainsi que les modalités d'exposition de la population, tenant compte, dans le temps, de leur mode de gestion et de la diffusion des substances dans l'environnement* ».

Partant de ces constats, l'Ae formule deux recommandations visant à préciser davantage la notion de nocivité des matières radioactives et des déchets radioactifs :

- « *Pour la complète information du public, l'Ae recommande de préciser, pour chaque matière, son activité et sa nocivité.* » ;
- « *L'Ae recommande que le concept de nocivité soit explicitement défini, en cohérence avec les principes des directives Euratom 2011/70 et 2013/59, en prenant tout particulièrement en compte les impacts potentiels pour la population, quelles que soient les générations concernées.* ».

Cet avis de l'Ae s'est traduit dans le PNGMDR 2016-2018 [1] par la recommandation R2¹ suivante : « [L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)] *remet avant le 31 décembre 2017, un rapport sur la méthodologie et les critères envisageables pour apprécier la nocivité des matières et déchets radioactifs. Ce rapport intègre des considérations sur l'évolution des caractéristiques des matières et des déchets radioactifs à court, moyen et long terme, leur écotoxicité et l'impact associé aux modalités de gestion envisagées dans le PNGMDR* ».

Publiée début 2018 et complétée en 2021, la méthode de l'IRSN [4][5] proposait de transcrire la demande initiale de l'Ae en élaborant un indicateur de nocivité destiné au public qui aurait figuré sur les fiches descriptives des familles de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (« *Inventaire national* » dans la suite du document)². Cet indicateur visait à informer sur la nocivité tant du point de vue du risque radiologique que chimique pour la population mais aussi pour la faune et la flore sauvages (« *faune/flore* » dans la suite du document). Cet indicateur faisait appel à un diagramme de Kiviat comme représentation graphique. Cette approche, présentée à diverses instances dont le Groupe de travail (GT) PNGMDR (62^{ème} réunion du GT PNGMDR, 21 septembre 2018) ou encore le Groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD) (29 septembre 2020), a fait l'objet de plusieurs critiques concernant son manque d'intuitivité et de compréhensibilité pour le public. Ses scénarios d'évaluation ont aussi été jugés trop complexes et peu représentatifs de la gestion des matières et déchets radioactifs.

¹ Recommandation reprise par l'article 1 de l'arrêté du 23 février 2017 [3].

² L'Andra a pour mission de réaliser et de publier, tous les 5 ans, l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs. Cet inventaire répertorie et rend publiques les informations sur la provenance, l'état des stocks et la localisation des matières et déchets radioactifs.
[Lien vers l'Inventaire national](#)

Parallèlement aux travaux de l'IRSN, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a développé sa propre méthode d'appréciation de la nocivité. Au-delà de la demande de l'Ae, l'objectif était de vérifier si un indicateur de nocivité pouvait éclairer la proportionnalité des solutions de gestion des déchets radioactifs au regard de leur nocivité. Entre 2018 et 2019, une collaboration avec le Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN) a abouti à un indicateur évaluant la nocivité intrinsèque d'un déchet radioactif, tant du point de vue chimique que radiologique. La particularité de l'approche était d'exprimer la nocivité en DALY (Disability Adjusted Life Years), correspondant aux années de vie perdue en bonne santé [6]. Cette méthode présente des avantages, notamment la possibilité de comparer dans une même unité le risque radiologique avec le risque chimique. Toutefois, plusieurs limites ont été identifiées, à commencer par le besoin d'assurer une meilleure cohérence entre les modalités de conversion en DALY des impacts chimique et radiologique. De plus, l'indicateur DALY ne permet pas d'exprimer la nocivité vis-à-vis de la faune/flore. Enfin, plusieurs critiques ont été adressées à l'encontre de cet indicateur, jugé alarmiste et inapproprié pour une juste information du public. Cette démarche n'a donc pas été poursuivie de manière opérationnelle et a depuis été abandonnée.

Comme cela sera précisé au chapitre 3, ces approches ont été développées sans définition formelle du terme « *nocivité* », absente du cadre réglementaire et législatif. La demande initiale de l'Ae ainsi que la recommandation R2 du PNGMDR 2016-218 ont été interprétées et traduites de manière opérationnelle sous la forme d'un indicateur de nocivité dont l'intérêt, la cible et les usages restent à préciser.

1.2 Contexte du PNGMDR 2022-2026

Dans la continuité de sa IV^{ème} édition, le PNGMDR 2022-2026 [7] confirme la volonté de poursuivre les travaux relatifs à la nocivité et formule l'action ENV.2 suivante :

« [...] *Les travaux sur l'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs seront poursuivis au travers des actions suivantes :*

1. *Évaluer la complémentarité éventuelle de l'approche exploratoire relative à l'indicateur de dangerosité exprimé en DALY avec l'approche présentée par l'IRSN.*
2. *Harmoniser les données d'entrée (inventaires radiologique et chimique notamment) en lien avec les producteurs, pour déployer la méthode sur l'ensemble des catégories de matières et familles de déchets.*
3. *Poursuivre le développement technique de la méthodologie IRSN avec des experts pluralistes [(représentation de l'indicateur, prise en compte du conditionnement, etc.)]*

L'Andra transmettra, sur la base des travaux menés avec l'IRSN et des experts pluralistes [...] un rapport présentant la méthodologie retenue et des exemples d'application, avec un premier déploiement de la méthode sur les déchets TFA³ et HA⁴ et MA-VL⁵ à plusieurs échéances temporelles caractéristiques de ces typologies de déchets.

Sur la base de cette méthodologie, les prochaines éditions de l'Inventaire national [...] comporteront des indications sur la nocivité pour certaines familles de déchets et catégories de matières, en fonction de l'avancement du déploiement de la méthodologie précitée ».

En complément, l'action POL.5 du PNGMDR 2022-2026 confirme que « *les travaux relatifs à la nocivité des substances radioactives [...] alimenteront les prochaines éditions de l'inventaire national afin d'améliorer l'information du public sur ce sujet* ».

Aussi, il est à noter que, dans son avis du 18 novembre 2021 relatif à l'évaluation environnementale du PNGMDR 2022-2026 [8], l'Ae réitère ses recommandations visant à mieux informer le public sur la nocivité des matières et déchets radioactifs.

Enfin, la transcription réglementaire du PNGMDR 2022-2026 inscrit, par Décret n° 2022-1547⁶ et par Arrêté du 9 décembre 2022⁷, la remise d'une méthode d'appréciation de la nocivité par l'Andra et précise que « *les éditions de l'inventaire national, prévu au 1° de l'article L. 542-12 du code de l'environnement, comportent des indications sur la nocivité des matières et des déchets radioactifs, si l'avancée des travaux le permet* ».

³ Très faible activité.

⁴ Haute activité.

⁵ Moyenne activité à vie longue.

⁶ Décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

⁷ Arrêté du 9 décembre 2022⁷ établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs que l'Andra

L'Andra est donc nommée pilote des réflexions qu'elle doit poursuivre avec l'appui de différents experts sur l'indicateur de nocivité. Dans ce cadre, et conformément au premier alinéa de l'action ENV.2, l'Andra a associé l'IRSN, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Electricité de France (EDF) et Orano pour élaborer une feuille de route remise à la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC), maître d'ouvrage du PNGMDR, au printemps 2023 [9]. Ce document propose une analyse comparée des méthodes d'évaluation de la nocivité développées (i) par l'IRSN dans le cadre du PNGMDR précédent, et (ii) par l'Andra à titre exploratoire et prospectif.

Il en ressort qu'aucune méthode ne répond pleinement aux besoins exprimés initialement par l'Ae et ne peut être appliquée en l'état. Pour dépasser ce constat, la feuille de route recense les questionnements encore en suspens et les actions à mener pour tenter de développer un outil d'appréciation de la nocivité qui fasse sens pour tous.

Il est important de souligner que, malgré les demandes de poursuite des travaux sur la nocivité, aucune définition claire du terme même de « *nocivité* » n'a été apportée dans le cadre du PNGMDR. De même, l'action ENV.2 du PNGMDR 2022-2026 reprend l'idée d'un indicateur de nocivité comme traduction opérationnelle de la demande de l'Ae, sans apporter davantage de précisions sur les cibles et usages de cet indicateur.

1.3 Etudes engagées depuis 2023 au travers de deux groupes de travail complémentaires

Sur la base de la feuille de route remise en 2023 [9] (cf. section 1.2 ci-avant) et pour approfondir les réponses à apporter à l'action ENV.2 du PNGMDR 2022-2026, l'Andra a lancé deux GT distincts aux objectifs complémentaires :

- un GT dit « *Restreint* » constitué en 2023 et dont elle est partie prenante ;
- un GT dit « *Pluraliste* » constitué en 2025 qu'elle anime sans y prendre part.

Le GT Restreint se compose d'experts de l'Andra, du CEA, d'EDF, d'Orano et de l'IRSN (désormais ASNR). Il a pour objectifs, d'une part de définir une méthode d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs, d'autre part de contribuer aux réflexions sur la représentation graphique d'un indicateur de nocivité, option retenue pour proposer une déclinaison opérationnelle de la demande initiale de l'Ae. Précisément, son mandat vise à répondre aux axes de travail identifiés dans la feuille de route [9] :

- révision des scénarios d'évaluation de la nocivité ;
- identification des temporalités pertinentes d'évaluation de la nocivité ;
- réflexion sur l'évolution de la représentation graphique actuelle sous forme de cadrans ;
- prise en compte des caractéristiques du conditionnement ;
- finalisation de l'intégration des substances chimiques, en lien avec l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).

Le GT Pluraliste se compose quant à lui de représentants de la société civile et d'experts aux profils variés. Il a pour objectif premier de proposer un indicateur de nocivité compréhensible par le public en définissant les informations à faire porter par cet indicateur et en choisissant sa forme pour garantir sa lisibilité. Les travaux, conclusions et perspectives de ce GT Pluraliste font l'objet d'un rapport indépendant du présent document [10]. A noter que des représentants du GT Restreint ont été invités à suivre les réunions plénières du GT Pluraliste, notamment pour leur présenter leur méthode d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs et répondre aux éventuels questionnements du GT Pluraliste.

2. Objet du rapport

Ce rapport synthétise les travaux menés par le GT Restreint à la suite de la publication de la feuille de route [9], au printemps 2023. Il détaille les modalités d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs et les choix méthodologiques proposés pour tenter d'élaborer un indicateur destiné au public. Il présente d'abord les principes structurants de la démarche, puis développe les différents sous-indicateurs définis par le GT Restreint pour tenter d'apprécier la nocivité chimique et radiologique vis-à-vis de l'être humain et/ou de la faune/flore. Une proposition d'échelle est ensuite présentée, accompagnée de premières pistes de réflexion sur la représentation graphique de l'indicateur de nocivité défini par le GT Restreint. La dernière partie identifie quant à elle les limites actuelles de la méthode, et questionne la pertinence de l'indicateur au regard notamment de la complexité de l'information qu'il délivre pour un lecteur non averti. Ces limites mettent en avant la nécessité d'un échange sur la méthode proposée et ses enjeux.

A noter que les développements actuels se sont portés prioritairement sur le cas des déchets radioactifs ; la suite du rapport expose donc principalement les avancées sur l'appréciation de la nocivité de ceux-ci. Ce périmètre ne préjuge pas de l'applicabilité de la méthode aux matières radioactives. Néanmoins, les choix structurants exposés au chapitre 3, à l'exception du choix de l'objet d'étude, devraient permettre d'intégrer les deux cas de figure. En revanche, les illustrations proposées au chapitre 4 concernent exclusivement le cas des déchets radioactifs. En tout état de cause, une partie du GT Restreint identifie le cas des matières radioactives comme piste de poursuite éventuelle des travaux, dans le cas où la méthode d'appréciation de la nocivité présentée ici viendrait à être poursuivie.

Ce rapport ne présente pas une méthode d'appréciation de la nocivité pouvant être déployée en l'état. Certains membres du GT Restreint s'accordent pour demander un cadrage précis justifiant l'intérêt d'un indicateur de nocivité et les attentes associées avant d'engager toute autre action (cf. chapitre 7), la question des modalités et du portage éventuel de ces travaux restant ouverte (GT Restreint ou autre groupe de travail). Pour un membre du GT Restreint cependant, les limites exposées au chapitre 7 sont telles qu'elles remettent en cause l'utilité et la pertinence même de l'indicateur de nocivité. Il considère que l'action devrait être clôturée. Selon lui, une reprise ne se justifierait que si un indicateur de nocivité chimique représentatif était mis en œuvre pour les substances chimiques en général. Il serait alors possible, à ses yeux, de l'appliquer aux substances radioactives qui ne constitueraient qu'un cas particulier. Par ailleurs, le rapport indépendant du GT Pluraliste [10] soulève des interrogations sur la pertinence de développer un tel indicateur de nocivité destiné au public, questionnement déjà évoqué dès la création du GT Restreint.

Avant l'engagement de toute autre action relative à l'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs, il apparaît donc nécessaire d'examiner attentivement les conclusions des deux groupes. Pour cela, le GT Restreint considère qu'il appartient au cadre global du PNGMDR de s'emparer du sujet, de se prononcer sur l'opportunité de poursuivre ou non ces travaux, et le cas échéant, de préciser les attendus et d'en définir les modalités.

3. Choix méthodologiques structurant la démarche d'appréciation de la nocivité

En 2016, l'Ae a formulé des recommandations relatives à la nocivité autour de deux axes majeurs : (i) améliorer l'information du public à ce sujet, et (ii) clarifier le concept de nocivité utilisé dans le Code de l'environnement. L'IRSN a proposé une première lecture de cette demande en 2018 à travers le développement de sa méthode [4] (cf. section 1.1 du présent rapport). Les travaux menés par la suite dans le cadre du GT Restreint ont permis de réinterroger les enjeux soulevés par l'Ae et leur interprétation. Les sections suivantes présentent les orientations structurantes retenues par le GT Restreint pour élaborer sa propre méthode d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs.

3.1 Lien entre l'indicateur de nocivité et les fiches descriptives des familles de l'Inventaire national

Dans sa méthode de 2018 [4], l'IRSN souligne que les travaux du PNGMDR s'appuient sur les données de l'Inventaire national tenu par l'Andra. Cet inventaire recense chaque année l'ensemble des matières et déchets radioactifs présents en France (nature, quantité, localisation) et synthétise ces informations notamment au travers de fiches descriptives des catégories de matières radioactives et des familles de déchets radioactifs.

S'agissant en particulier des déchets radioactifs, l'IRSN estime que les données renseignées dans ces fiches, issues des éléments à déclarer à l'Inventaire national définis par l'arrêté du 9 octobre 2008⁸ et reprises dans le PNGMDR, ne permettent pas d'évaluer facilement la nocivité d'une famille de déchets radioactifs, ni de la comparer à une autre. On y trouve certes les volumes « *équivalent conditionné* » (exprimés en m³) de colis de déchets radioactifs produits, les activités radiologiques des émetteurs α , β et γ contenus dans ces colis (exprimées en Becquerel, Bq), ou encore la liste de certaines substances chimiques en présence. Toutefois, rien n'indique directement le niveau de nocivité associé à chaque famille de déchets radioactifs. La classification des déchets radioactifs apporte néanmoins des références à ce sujet mais si cette lecture peut sembler évidente pour un expert, elle n'apparaît pas clairement au niveau de l'Inventaire national et reste difficilement accessible pour le public.

Pour pallier ce manque d'information, l'IRSN propose d'ajouter un indicateur de nocivité directement sur les fiches descriptives des familles de déchets radioactifs de l'Inventaire national⁹. Cet indicateur aurait pour objectif de fournir une information sur les niveaux de nocivité chimique et radiologique en jeu pour chaque famille de déchets radioactifs. L'Inventaire national étant destiné à un large public, afficher cet indicateur sur les fiches descriptives permettrait de l'informer directement.

L'action ENV.2 du PNGMDR 2022-2026 reprend cette idée d'ajouter un indicateur de nocivité sur les fiches descriptives de l'Inventaire national et prévoit que « *les prochaines éditions de l'Inventaire national comporteront des indications sur la nocivité pour certaines familles de déchets et catégories de matières, en fonction du déploiement de la méthodologie précitée* ».

Au lancement du GT Restreint, le choix des fiches descriptives de l'Inventaire national comme support d'information a été questionné : s'agit-il d'un support pertinent ? Le public consulte-t-il vraiment l'Inventaire national et cherche-t-il à connaître la nocivité des colis de déchets radioactifs ? Quelles informations supplémentaires seraient apportées par un indicateur de nocivité en plus des catégories, volumes et activités radiologiques déjà fournis ?

Malgré leurs interrogations, et pour répondre formellement à cette demande, les membres du GT Restreint ont décidé de poursuivre leurs réflexions à partir des fiches descriptives de l'Inventaire national, en cherchant à les enrichir au mieux. Ils ont estimé que ne pas parvenir à un indicateur apportant une information pertinente à ce niveau constituerait dans tous les cas un résultat. Sur cette base, les membres du GT Restreint se sont accordés sur la nécessité de clarifier certains fondamentaux préalables : de quelle nocivité parle-t-on exactement ? Qu'évalue-t-on précisément ? Ces différentes questions sont traitées dans les sections suivantes.

⁸ Arrêté du 9 octobre 2008 relatif à la nature des informations que les responsables d'activités nucléaires et les entreprises mentionnées à l'article L. 1333-10 du code de la santé publique ont obligation d'établir, de tenir à jour et de transmettre périodiquement à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

⁹ Le catalogue des catégories de matières radioactives ayant été publié pour la première fois en décembre 2023, l'IRSN a ciblé ses travaux de 2018 sur le catalogue des familles de déchets radioactifs.

3.2 Appréciation de la nocivité intrinsèque

Comme le souligne l'avis de l'Ae de 2016 [2], la notion de nocivité ne dispose pas d'une définition établie. Et même si, depuis 2016, les recommandations se succèdent pour informer sur la nocivité des matières et déchets radioactifs, le terme même de « *nocivité* » n'est toujours pas défini clairement. L'IRSN en a proposé une première lecture dans sa méthode de 2018 [4][5] et le GT Restreint s'est à nouveau penché sur la question, en réexaminant à la fois la définition de la nocivité et ses modalités d'appréciation vis-à-vis des matières et déchets radioactifs. Les paragraphes suivants présentent la proposition établie en GT Restreint.

3.2.1 Qu'est-ce que la nocivité ? Qu'entend-on par intrinsèque ?

En s'appuyant sur les premières réflexions de l'IRSN, le GT Restreint observe que le terme de « *nocivité* » est utilisé dans le Code de l'environnement pour exprimer l'exigence de réduction applicable à la gestion des déchets radioactifs, sans y être explicitement défini¹⁰. Le Code de l'environnement emploie également le terme de « *dangerosité* », notamment pour la classification des substances, des mélanges (règlement CLP¹¹) et des déchets (directive cadre déchet¹²).

Par ailleurs, dans le langage courant, la nocivité désigne généralement une caractéristique susceptible de nuire à la santé, indépendamment de facteurs extérieurs. Elle recoupe ainsi des notions comme la « *dangerosité* », la « *toxicité* », la « *malignité* » ou le « *caractère délétère* ». La nocivité renvoie donc à la propriété intrinsèque d'un objet, capable de porter atteinte à la santé.

Le terme « *intrinsèque* » a également fait l'objet de discussions au sein du GT Restreint. Par définition, il désigne ce qui appartient en propre à une chose, indépendamment de facteurs extérieurs. Il peut être rapproché des termes « *inhérent* » (qui tient à l'essence d'un être ou d'une chose) ou « *constitutif* » (au fondement d'un être ou d'une chose).

Apprécier la « *nocivité intrinsèque* » revient ainsi à qualifier la capacité propre d'un objet à nuire à la santé. Sur cette base, le GT Restreint a choisi de conserver la définition proposée par l'IRSN en 2018, considérant la nocivité comme **une caractéristique intrinsèque du déchet radioactif ou de la matière radioactive**.

3.2.2 Comment évaluer la nocivité intrinsèque ?

A partir de la définition de la nocivité retenue par le GT Restreint, l'enjeu est d'apprécier au mieux les caractéristiques intrinsèques susceptibles d'altérer la santé de l'être humain et/ou de la faune/flore. Cette appréciation nécessite de définir des situations d'exposition (aussi appelées scénarios d'exposition), c'est-à-dire de décrire les conditions dans lesquelles l'être humain et/ou la faune/flore entre en contact avec un agent dangereux en précisant notamment les voies d'exposition (e.g., ingestion, inhalation), la fréquence ou encore la durée d'exposition. Pour cela, deux grandes logiques peuvent être considérées.

La première consiste à identifier et quantifier l'ensemble des effets délétères pouvant s'exprimer sur l'être humain et/ou la faune/flore au travers de situations d'exposition normalisées. C'est l'approche adoptée par le règlement CLP¹¹ pour la classification des substances et mélanges chimiques : elle repose sur des situations d'exposition normalisées et simplifiées, non représentatives de conditions réelles, dont l'objectif est de couvrir l'éventail le plus large possible des dangers. Ainsi, le pictogramme « *très dangereux pour la santé* » est par exemple attribué sur la base de situations d'exposition telles que l'administration par voie orale ou cutanée d'une dose unique, de doses multiples réparties sur 24 heures, ou encore d'une exposition par inhalation durant 4 heures. Ces paramètres, volontairement simplifiés, ne visent pas à reproduire des conditions réelles mais à balayer l'ensemble des dangers possibles.

La seconde vise à évaluer précisément les effets réels ou potentiels dans des conditions spécifiques données. C'est celle qui est retenue dans les évaluations réglementaires des sites industriels existants ou en projet, réalisées dans le cadre des études d'impact ou des bilans de surveillance. Elle s'appuie sur des données propres au site et sur des situations d'exposition plus ou moins complexes cherchant à refléter au

¹⁰ L'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement prévoit que le PNGMDR respecte un certain nombre d'orientations, en particulier « la réduction du volume et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le traitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs ».

¹¹ Le règlement européen n° 1272/2008, dit CLP pour classification, étiquetage et emballage des substances et des mélanges, est un règlement européen directement applicable dans l'ensemble des États membres de l'Union européenne. Il a pour objectif de communiquer sur les dangers de toutes les substances chimiques et de tous les mélanges dangereux au niveau européen, via l'étiquetage et les fiches de données de sécurité, pour informer les consommateurs et les travailleurs et protéger la santé humaine et l'environnement.

¹² Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets. La directive-cadre relative aux déchets prévoit des mesures permettant de lutter contre les effets nocifs de la production et de la gestion des déchets sur l'environnement et la santé humaine

plus près les conditions d'exposition effectives, afin d'identifier les risques réellement encourus, c'est-à-dire les dangers dont la probabilité d'effet est avérée.

Ces deux logiques permettent d'obtenir deux informations bien distinctes :

- l'ensemble des dangers possibles pour la première ;
- les risques potentiellement encourus (i.e. les dangers dont la probabilité d'effet est avérée) pour la seconde.

Appliquées aux matières et déchets radioactifs, ces deux logiques font appel à des situations d'exposition fondamentalement différentes :

- d'un côté, des situations simplifiées et irréalistes, qui mobilisent un minimum de paramètres et dépendent le moins possible de comportements humains ou d'intervention humaine. Cela permet de couvrir au maximum l'ensemble des effets délétères intrinsèques d'un déchet radioactif ou d'une matière radioactive, y compris ceux qui ne se manifesteraient pas en conditions réelles ;
- de l'autre, des situations s'approchant au plus près des conditions réelles, qui nécessitent des modèles et paramètres plus détaillés et qui atténuent *de facto* certains effets délétères. Ces situations ne reflètent plus les propriétés intrinsèques du déchet radioactif ou de la matière radioactive, dans la mesure où elles dépendent de paramètres d'entrée, des caractéristiques des populations ou encore de modes de gestion (conditionnement, entreposage, transport et stockage) dont les variations influencent le niveau de nocivité évalué *in fine*.

Retenant la définition de la nocivité comme une « *caractéristique intrinsèque du déchet radioactif ou de la matière radioactive susceptible d'altérer la santé de l'être humain et/ou des écosystèmes* », le GT Restreint a donc opté pour la première logique à savoir : chercher à refléter l'ensemble des dangers vis-à-vis des êtres humains et/ou de la faune/flore possiblement causé par le déchet radioactif ou la matière radioactive en tant que tels. Dans ce cadre, il a été retenu de s'appuyer sur des situations d'exposition normalisées, simples et généralisables, plutôt que sur des situations d'exposition réalistes.

3.2.3 Cibles de protection et type de danger

Jusqu'ici, plusieurs termes ont été employés de manière quasi équivalente dans ce rapport : écosystèmes et faune/flore, population et être humain. Il convient néanmoins d'en préciser le sens avant de détailler plus avant la méthode développée par le GT Restreint.

Dans son avis de 2016, l'Ae mentionne les impacts écotoxicologiques visant les écosystèmes et les impacts sur les populations humaines. Dans la continuité des méthodes définies par l'IRSN et l'Andra, le GT Restreint a bien confirmé le choix de retenir deux cibles de protection : l'être humain et la faune/flore. Si le terme « *écosystèmes* » employé par l'Ae correspond à l'expression « *faune/flore* » employée dans le présent rapport, une nuance s'impose entre les vocables « *être humain* » retenu par le GT Restreint et « *population humaine* » utilisé par l'Ae. Le GT Restreint retient en effet de travailler sur l'être humain et plus précisément sur un individu de référence théorique, ce qui permet de rester au plus près des conditions de l'intrinsèque. En revanche, cibler une population aurait conduit à introduire des situations d'exposition, des comportements et des vulnérabilités plus réalistes, mais incompatibles avec la logique retenue par le GT.

Enfin, il convient de souligner que la demande initiale de l'Ae se limite aux potentiels de dangers radiologiques, chimiques et écotoxicologiques. Les autres types de danger tels que l'inflammabilité ou la thermicité des matières et déchets radioactifs ne sont donc pas intégrés aux réflexions.

3.2.4 Les limites associées au choix de la nocivité intrinsèque

Le choix d'évaluer la nocivité intrinsèque conduit à un certain nombre de limites. La première tient à la difficulté d'appréhender une caractéristique véritablement intrinsèque : aussi simples et normalisées soient-elles, les situations d'exposition intègrent nécessairement un minimum d'hypothèses qui s'éloignent inévitablement des conditions théoriques de l'intrinsèque. De là, tout changement de ces hypothèses (durée et distance d'exposition, quantité incorporée, etc.) implique une modification du niveau de nocivité évalué et entre en contradiction avec la notion d'intrinsèque.

Par ailleurs, il convient de garder à l'esprit que l'appréciation de la nocivité intrinsèque des matières et déchets radioactifs vise à couvrir l'ensemble des potentiels de danger. Il s'agit d'apprécier des effets potentiels dont l'apparition n'est pas avérée. Les niveaux de nocivité ainsi obtenus ne sont pas comparables à ceux estimés pour des situations d'exposition plus réalistes telles que présentées dans les dossiers réglementaires. Ceci rend toute comparaison avec des situations concrètes impossible.

Néanmoins, le recours à des situations normalisées présente l'avantage de permettre la comparaison des matières et déchets radioactifs entre eux du point de vue de la nocivité, ce qui ne serait pas possible avec des situations réalistes, dont les résultats dépendraient des conditions de gestion propres à chacun. **La méthode retenue permet ainsi de comparer chaque déchet radioactif ou matière radioactive sur la base de ses effets potentiels (ou potentiels de danger) sur l'être humain et/ou la faune/flore.**

3.3 L'objet d'étude : le colis de déchets radioactifs

Dans sa méthode publiée en 2018 [4], l'IRSN a choisi d'évaluer la nocivité du colis de déchets radioactifs dans sa globalité, sans distinguer les déchets radioactifs des matériaux constitutifs du colis. Ce choix a par la suite fait l'objet de critiques, portant notamment sur le fait que l'effet protecteur du conditionnement n'était pas pris en compte dans les calculs de nocivité. Le GT Restreint s'est saisi de ces réflexions, et ses conclusions sont présentées dans les paragraphes suivants.

3.3.1 Rappel des éléments constitutifs d'un colis de déchets radioactifs

A l'issue de leur production, les déchets radioactifs, lesquels diffèrent notamment par leurs caractéristiques radiologiques (e.g., niveau d'activité, durée de vie, caractère irradiant) ainsi que leurs formes et natures physico-chimiques (déchets solides métalliques, déchets liquides organiques, déchets solides de type minéral, etc.), font l'objet d'un éventuel traitement puis d'un conditionnement en colis de déchets radioactifs. Ces opérations sur les déchets radioactifs visent notamment à assurer le confinement passif des radionucléides et substances chimiques qu'ils contiennent et à faciliter leur manutention.

On distingue plusieurs éléments constitutifs d'un colis de déchets radioactifs en fonction des caractéristiques radiologiques et physico-chimiques des déchets radioactifs :

- les déchets radioactifs en eux-mêmes ;
- l'éventuelle matrice qui correspond au matériau avec lequel les déchets radioactifs sont mélangés intimement ou non pour éviter leur dispersion (e.g., bitume, verre, liant hydraulique) ;
- l'éventuel matériau de remplissage qui assure le blocage mécanique des déchets radioactifs ou bien complète le remplissage du colis, en vue notamment de réduire les vides ;
- le conteneur ou enveloppe qui constitue l'emballage du colis, permet sa manutention et peut participer à, voire assurer ses performances (barrière de confinement supplémentaire, rôle de protection vis-à-vis des rayonnements ionisants, etc.).

Etant donné la diversité des déchets radioactifs produits, il existe également une grande diversité de colis de déchets radioactifs parmi lesquels le GT Restreint distingue (i) des colis de déchets radioactifs dits « *homogènes* », au sein desquels les déchets radioactifs sont mélangés à une matrice (e.g., colis bitumés), sans pour autant que la répartition des radionucléides et substances chimiques y soit toujours uniforme et (ii) des colis de déchets radioactifs dits « *hétérogènes* » au sein desquels les déchets radioactifs sont physiquement distincts des éventuels matériaux de remplissage.

3.3.2 Choix de l'objet d'étude

Pour apprécier au plus juste la nocivité des déchets radioactifs, les membres du GT Restreint se sont questionnés sur la pertinence d'évaluer la nocivité du (i) « *déchet pur* », du (ii) « *bloc déchet* » - soit les déchets radioactifs et leur matrice ou matériau de remplissage - ou du (iii) colis de déchets radioactifs dans son ensemble.

Le choix du GT Restreint s'est porté sur l'évaluation de la nocivité du **colis de déchets radioactifs dans son ensemble**. Plusieurs raisons justifient cet arbitrage, à commencer par le fait que les modalités habituelles de communication sur la gestion des déchets radioactifs portent sur le colis de déchets en lui-même, et non sur le « déchet pur ». Mais les raisons ne s'arrêtent pas là :

- conformément aux modalités de déclaration précisées dans la réglementation, la majeure partie des fiches descriptives des familles de l'Inventaire national porte sur des déchets radioactifs déjà conditionnés ou pour lesquels des hypothèses de conditionnement ont été définies. Afficher un indicateur de nocivité du « déchet brut » ou du « bloc déchet » créerait donc un décalage avec les autres informations fournies dans la fiche descriptive ;
- par ailleurs, des tests ont été réalisés pour évaluer les potentiels de nocivité des différentes configurations à savoir « déchet pur », « bloc déchet » et « colis dans son ensemble ». Les résultats sont présentés en Annexe (cf. chapitre 10). Il en ressort que les classements des potentiels de nocivité entre colis de déchets radioactifs restent globalement inchangés pour les trois alternatives étudiées, que ce soit pour la nocivité chimique ou pour la nocivité radiologique (cf. chapitre 10). Ce constat a donc renforcé le GT Restreint dans son choix de maintenir le colis de déchets radioactifs dans son ensemble comme objet d'appréciation de la nocivité.

3.3.3 Les limites identifiées

L'appréciation de la nocivité des déchets radioactifs à l'échelle du colis de déchets radioactifs présente plusieurs limites. En effet, ce choix éloigne l'indicateur de nocivité de son caractère intrinsèque au sens strict, puisqu'il intègre d'autres constituants que le déchet pur comme la matrice éventuelle, le matériau de remplissage éventuel et le conteneur (cf. paragraphe 3.3.1). Cependant, le GT Restreint ayant par ailleurs constaté qu'il n'était pas possible d'accéder à la notion de « déchet pur » de manière homogène pour tous les déchets, cela rend cette limite acceptable puisque insolvable. Par ailleurs, les propriétés propres au colis de déchets radioactifs dans son ensemble ainsi que sa performance de confinement tant pour les radionucléides que pour les substances chimiques ne sont pas prises en compte. Le colis de déchets radioactifs est traité comme un simple objet d'étude, caractérisé uniquement par sa masse, sans que son comportement réel ne soit considéré. La seule exception concerne l'évaluation des niveaux d'irradiation (cf. chapitre 4), pour laquelle l'atténuation des rayonnements ionisants assurée par les constituants du colis est intégrée.

L'application de l'approche au cas de matières radioactives, dont les conditionnements non définitifs visent exclusivement à participer à leur entreposage dans des conditions sûres et ne sont en rien comparables aux conditionnements retenus pour les déchets radioactifs en prévision de leur stockage, n'est pas acquise à ce stade. Cela constitue donc une piste de travail identifiée au chapitre 7.

3.4 Bilan des choix structurants réalisés

Pour définir une méthode d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs, le GT Restreint a proposé plusieurs choix structurants.

Premièrement, l'objectif est d'éclairer sur la nocivité des matières et déchets radioactifs au moyen d'un indicateur de nocivité « intrinsèque » à venir apposer sur les fiches descriptives de l'Inventaire national. Cet indicateur cherche à couvrir l'ampleur des effets néfastes pour l'être humain et/ou la faune/flore susceptibles d'être causés par les matières ou les déchets radioactifs indépendamment de leurs modalités de gestion. Il rend compte de potentiels effets ou, autrement dit, de dangers potentiels et non de risques avérés.

Deuxièmement, portant en priorité ses efforts sur le cas des déchets radioactifs, l'objet d'appréciation retenu par le GT Restreint est le colis de déchets radioactifs dans son ensemble - conditionnement inclus - sans toutefois rendre compte de ses performances de confinement, à l'exception du cas de l'irradiation (cf. chapitre 4). L'idée est avant tout d'assurer une cohérence entre, d'une part l'objet visé par l'indicateur de nocivité, d'autre part les descriptions et les données fournies dans les fiches descriptives des familles de déchets radioactifs de l'Inventaire national.

A la lecture de ces choix structurants il est important d'avoir en tête que cet indicateur de nocivité ne présente pas le résultat d'une évaluation absolue de la nocivité des déchets radioactifs dans le cadre de leur gestion réelle. Cela relève en effet des évaluations de sûreté et des études d'impacts conduites par les exploitants et instruites par les autorités compétentes. Cet indicateur **visé davantage à informer le public sur les potentiels de danger des différents colis de déchets radioactifs et d'en permettre une comparaison.**

Au regard de l'action ENV.2, les choix structurants réalisés visent à répondre formellement à la demande de définir un indicateur de nocivité à destination du public. Néanmoins, par rapport à la recommandation initiale de l'Ae, on peut noter que si l'exigence d'information du public est satisfaite, celle portant sur une meilleure prise en compte des modes de gestion, des impacts potentiels sur les populations et de la diffusion des substances dans l'environnement ne l'est pas. Ces derniers enjeux relèvent des études d'impacts et semblent incompatibles avec ceux d'un indicateur global de nocivité intrinsèque. Le chapitre 7 revient d'ailleurs sur cet aspect de la demande initiale de l'Ae et en explique toute l'ambivalence.

4. Définition des sous-indicateurs de nocivité

Les choix détaillés au chapitre 2 structurent la méthode d'appréciation de la nocivité proposée par le GT Restreint. Sur la base de situations d'exposition volontairement simplifiées, différents sous-indicateurs ont été retenus pour éclairer la nocivité radiologique et chimique, vis-à-vis de l'être humain et/ou de la faune/flore. Les paragraphes suivants présentent les principes associés aux choix de situations qui ont abouti au total à 10 sous-indicateurs de nocivité. A noter que les sous-indicateurs de nocivité présentés ici ont été définis en première approche pour s'appliquer aux colis de déchets radioactifs. Le cas des matières radioactives, qui nécessiterait des adaptations spécifiques qui restent à définir (cf. chapitre 7), n'est pas abordé dans ce chapitre.

4.1 Principes associés à la définition des sous-indicateurs de nocivité

4.1.1 Deux composantes et deux cibles de protection

La demande initiale de l'Ae, traduite par l'action ENV.2 du PNGMDR 2022-2026, prévoit que l'indicateur de nocivité des matières et déchets radioactifs rende compte à la fois des enjeux radiologiques et chimiques, pour deux cibles de protection : l'être humain d'une part, et la faune/flore d'autre part. Sur cette base, des sous-indicateurs de nocivité ont été construits en cherchant à couvrir l'ensemble des potentiels de dangers pouvant s'exprimer pour chacune des cibles. Plusieurs jeux de scénarios distincts ont donc été définis pour (i) le cas de l'être humain et (ii) le cas de la faune/flore, tout en veillant à conserver une cohérence d'ensemble entre les approches. Les nocivités radiologique et chimique sont donc appréciées à partir des mêmes situations d'exposition ; seules les modalités d'appréciation diffèrent selon la composante considérée.

4.1.2 Des situations simplifiées et normalisées

4.1.2.1 Une logique d'appréciation cohérente avec les études d'impact

Le choix d'un indicateur de nocivité intrinsèque (cf. section 3.2 du présent document) implique de se concentrer sur les caractéristiques propres de l'objet d'étude, en s'affranchissant au maximum des paramètres extérieurs pouvant influencer les niveaux de nocivité obtenus *in fine*. Les situations d'exposition retenues sont similaires à celles utilisées dans les études d'impact, avec une différence majeure néanmoins : des hypothèses simplificatrices sont prises en compte pour réduire le nombre de données d'entrée. L'approche décrite ici est donc conceptuellement classique, sa spécificité résidant dans la simplification poussée des paramètres d'entrée.

Prenons l'exemple d'une situation d'exposition par ingestion du fait de la consommation de produits alimentaires issus d'un sol contaminé. Le niveau de nocivité radiologique proposé repose sur le calcul d'une dose par ingestion exprimée - de manière simplifiée - selon la formule [A].

$$[A] \quad Dose_{ingestion} = \sum_{RN} [Activité_{RN} \times facteur\ de\ transfert_{RN} \times quantité\ ingérée \times Coef\ Dose_{ing_{RN}}]$$

Avec :

- *Activité_{RN}*, l'activité du radionucléide contenu dans 1 kilogramme de sol (Bq/kg sol) ;
- *Facteur de transfert_{RN}*, le facteur de transfert racinaire du radionucléide vers la plante consommée (Bq/g.(Bq/kg sol)⁻¹) ;
- *Quantité ingérée*, la quantité de produit contaminé ingéré (g) ;
- *Coef Dose_{ing RN}*, le coefficient de dose associé à l'ingestion du radionucléide (Sv/Bq).

Dans une étude d'impact, la plupart des données d'entrée serait adaptée pour refléter au mieux les conditions réelles (par exemple en tenant compte de quantités ingérées, variables en fonction des aliments consommés).

Pour l'indicateur de nocivité, la démarche est inverse : le nombre de paramètres est réduit au minimum, de sorte que la nocivité dépende le plus possible des termes propres aux caractéristiques radiologiques et chimiques du colis de déchets radioactifs. Dans le cas présent, il s'agit de fixer les paramètres indépendants du radionucléide à 1 pour ne cibler que les activités des radionucléides présents dans le colis de déchets radioactifs et les coefficients de dose par ingestion associés. Cela conduit à la formule [B], qui revient à l'appréciation de la radiotoxicité potentielle¹³ pour 1 Bq/kg sol.

$$[B] \quad Dose_{ingestion} = \sum_{RN} [Activité_{RN} \times Coef\ Dose_{ingRN}]$$

Cette formule met en évidence que la valeur de nocivité ainsi obtenue ne constitue pas une quantification absolue d'un impact réel, mais reflète **un potentiel de danger** non rattaché à une situation concrète. En revanche, l'ensemble des colis de déchets radioactifs étant évalué selon le même principe, la comparaison entre colis est exempte de biais : **la valeur de nocivité revêt ainsi une portée relative**.

4.1.2.2 Des données d'entrée normalisées

Dans cette même logique de simplification et de comparaison fiable entre les colis de déchets radioactifs, plusieurs données d'entrée ont été normalisées.

Concernant les colis de déchets radioactifs d'abord, leur variabilité en termes de masse, de volume et de conditionnement empêche de raisonner sur l'activité radiologique et les quantités de substances chimiques globales sans introduire de biais. Pour pallier cette difficulté, ces grandeurs ont été ramenées à une masse de référence commune : 1 gramme de colis de déchets radioactifs. Ainsi, l'activité de chaque radionucléide et la quantité de chaque substance chimique ont été recalculées pour correspondre à ce que l'on retrouverait dans 1 gramme de colis de déchets radioactifs (en faisant l'hypothèse d'une répartition homogène dans le colis).

A noter qu'il s'agit d'une approche courante pour comparer des grandeurs entre elles. C'est le cas notamment pour le Nutri-Score, calculé pour 100 grammes ou 100 millilitres de produit.

Aussi, les paramètres associés aux situations d'exposition elles-mêmes ont parfois été normalisés pour simplifier au maximum les raisonnements. C'est notamment le cas de la situation d'exposition visant à apprécier la nocivité vis-à-vis de la faune/flore (cf. section 4.3 du présent document).

4.1.3 Temporalités évaluées

L'action ENV.2, de même que la demande initiale de l'Ae, prévoient d'informer le public sur l'évolution temporelle de la nocivité. Plusieurs temporalités ont été proposées par la méthode de l'IRSN [4][5] et l'approche exploratoire de l'Andra [6]. Elles ont été discutées dans le cadre de la feuille de route [9] publiée en 2023. Il a finalement été choisi de retenir 5 temporalités distinctes. La première (T0), correspond à l'état actuel de l'inventaire radiologique contenu dans les colis de déchets radioactifs. Les temporalités suivantes permettent de mettre en lumière le phénomène de décroissance radioactive à différents horizons temporels : T0 + 500 ans, T0 + 1000 ans, T0 + 10 000 ans et T0 + 100 000 ans. Pour rappel, ces pas de temps ont été définis pour « *apporter un éclairage sur les différentes catégories de déchets radioactifs en intégrant plus particulièrement les caractéristiques des radionucléides contenus dans les colis, dont les périodes radioactives vont de l'ordre de l'année à la dizaine de milliards d'années.* » [9].

Concernant la nocivité chimique, l'évolution dans le temps n'est pas prise en compte : les substances chimiques sont supposées conserver les mêmes propriétés physico-chimiques, sans tenir compte des phénomènes de dégradation qui peuvent s'opérer au fil du temps. Ces enjeux ont été largement discutés avec l'Ineris, qui souligne le fait que l'intégration des phénomènes de dégradation ne peut se faire qu'en tenant compte des caractéristiques du milieu d'étude, et notamment de sa physico-chimie. Introduire de telles hypothèses induirait l'ajout de paramètres extérieurs qui éloigneraient les sous-indicateurs des propriétés intrinsèques des colis de déchets radioactifs. Il a donc été décidé de ne pas modéliser d'évolution temporelle pour la composante chimique de la nocivité.

¹³ La radiotoxicité potentielle est un indicateur développé au début des années 1990 dans le cadre des réflexions sur la gestion des déchets radioactifs pour comparer le danger associé à diverses catégories de déchets ou matières.

4.2 Appréciation de la nocivité vis-à-vis de l'être humain

4.2.1 Présentation des situations d'exposition retenues

A partir des principes exposés en section 4.1, les situations d'exposition retenues pour apprécier la nocivité vis-à-vis de l'être humain visent à couvrir l'ensemble des expositions possibles, tout en limitant le nombre de paramètres d'entrée et en assurant une cohérence d'approche entre les nocivités chimique et radiologique.

Pour l'être humain, les voies d'exposition habituellement considérées sont l'ingestion et l'inhalation (exposition interne), auxquelles s'ajoute, dans le cas spécifique de la nocivité radiologique, l'irradiation (exposition externe). Deux situations ont ainsi été définies : une situation propre à la nocivité radiologique intégrant l'exposition externe, et une situation commune aux substances chimiques et aux radionucléides, limitée à l'exposition interne par ingestion et par inhalation.

4.2.1.1 Situation d'exposition externe

Pour simplifier l'évaluation de l'irradiation (exposition externe) liée aux colis de déchets radioactifs, il est proposé d'apprécier une exposition directe au contact du colis de déchets radioactifs pendant 1 heure. Ce scénario permet d'évaluer un débit d'équivalent de dose (DeD) horaire.

4.2.1.2 Situation d'exposition interne par ingestion et inhalation

La situation d'exposition interne s'applique de manière identique pour les substances chimiques et les radionucléides présents dans le colis de déchets radioactifs. Elle repose sur l'hypothèse de l'ingestion ou de l'inhalation de 1 gramme de colis déchets radioactifs, ce qui permet de réduire au maximum le nombre des paramètres d'entrée. A noter que l'entièreté du gramme de colis est considérée comme ingérée ou inhalée. Les phénomènes de dispersion et les caractéristiques de biodisponibilité des substances chimiques et des radionucléides ne sont donc pas pris en compte. De cette façon, seules la quantité ingérée/inhalée et les caractéristiques de toxicité associées (e.g., coefficients de dose pour les radionucléides et valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour les substances chimiques) sont considérées dans l'appréciation de la nocivité chimique et radiologique vis-à-vis de l'être humain.

4.2.1.3 Bilan des situations d'exposition retenues

Sur la base des situations d'exposition présentées précédemment, le Tableau 1 résume les situations d'exposition prises en compte pour définir les sous-indicateurs de nocivité vis-à-vis de l'être humain.

Tableau 1 : Situations d'exposition prises en compte pour apprécier la nocivité radiologique et chimique vis-à-vis de l'être humain

	Nocivité radiologique	Irradiation (exposition externe)	
		Exposition interne (inhalation et ingestion)	
	Nocivité chimique	Exposition interne (inhalation et ingestion)	

4.2.2 Sous-indicateurs de nocivité radiologique vis-à-vis de l'être humain

Pour apprécier la nocivité radiologique vis-à-vis de l'être humain, trois sous-indicateurs reflétant les enjeux d'exposition externe et interne ont été définis.

4.2.2.1 Nocivité radiologique liée à l'exposition externe

La nocivité radiologique associée à l'exposition externe est appréciée au travers du **sous-indicateur n°1** relatif à l'**irradiation** (ou DeD) évaluée au contact d'un colis de déchets radioactifs pendant 1 heure. Ce sous-indicateur s'exprime en Sievert par heure (Sv/h).

L'évaluation du DeD s'opère selon trois modalités principales :

- pour les colis de déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC), des mesures de DeD au contact sont systématiquement réalisées. La valeur moyenne de ces mesures a été utilisée pour caractériser le DeD associé à la famille correspondante à T0. Pour les autres échéances temporelles, le DeD est ensuite extrapolé dans le temps à partir de l'inventaire radiologique à T0 du colis de déchets radioactifs considéré. A partir du moment où les valeurs extrapolées se situent en-dessous du bruit de fond radiologique (estimé à 100 nSv/h), cette valeur de 100 nSv/h leur est attribuée ;
- pour les colis de déchets radioactifs TFA, les valeurs mesurées de DeD sont peu significatives. Par ailleurs, au sein de l'Inventaire national, l'ensemble des colis de déchets radioactifs TFA est regroupé en une seule famille. Il a donc été choisi d'attribuer une valeur forfaitaire unique de DeD à tous ces colis, fixée à 10 µSv/h à T0. Cette valeur forfaitaire est jugée conservatrice au regard des mesures effectuées, 95% d'entre elles se situant en-dessous de ce seuil. Le DeD est ensuite extrapolé dans le temps à partir de l'inventaire radiologique à T0. A noter qu'à partir du moment où les valeurs extrapolées se situent en-dessous du bruit de fond radiologique (estimé à 100 nSv/h), cette valeur de 100 nSv/h leur est attribuée ;

Particularité des déchets TFA

Les réflexions menées dans les années 1990 ont conduit les autorités françaises à écarter la mise en place de seuils de libération des déchets radioactifs alors que cette approche est pourtant largement adoptée dans le monde et en particulier en Europe. Une logique de zonage a été choisie à la place. Ainsi, chaque installation nucléaire distingue les zones à production possible de déchets nucléaires (ZppDN), des zones non susceptibles d'en produire, alors désignées comme zones à déchets conventionnels (ZDC). Une filière dédiée à la gestion des déchets TFA a par ailleurs été mise en place. Ces modalités conduisent à qualifier de déchets TFA des déchets dont l'activité est parfois extrêmement faible, voire non détectable par rapport à la radioactivité naturelle. Généralement, l'activité des déchets TFA est inférieure à 100 Bq/g et est souvent bien en deçà. A noter que les colis TFA retenus pour ce rapport ont été sélectionnés sur la base du niveau de détail des données disponibles les concernant, condition nécessaire à leur évaluation sur l'ensemble des critères analysés. Ils ne sont donc pas représentatifs des niveaux d'activité habituellement rencontrés.

- pour tous les autres colis de déchets radioactifs à savoir les colis HA, MA-VL, et de Faible Activité à Vie Longue (FA-VL), les mesures de DeD au contact et leurs évolutions dans le temps sont déclarés par les producteurs de déchets afin de permettre à l'Andra de dimensionner ses stockages et de réaliser les études de sûreté associées. Même si ces DeD sont déclarés par les producteurs pour les colis produits et pour ceux qui sont à l'étude, il existe quelques familles de colis de déchets radioactifs pour lesquels les DeD ne sont pas disponibles. Pour ces quelques familles, sur la base des inventaires radiologiques et des hypothèses de conditionnement, les DeD au contact ont été appréciés pour l'exercice aux différentes temporalités (de T0 à T0+100 000) à l'aide d'un outil de modélisation¹⁴.

¹⁴ Pour les premiers tests réalisés, l'outil RayXpert a été utilisé. Il s'agit d'un outil de modélisation 3D combiné à un calcul de dose par la méthode Monte Carlo. A noter que cet outil ne présage pas du choix qui pourrait être fait si la méthode d'appréciation de la nocivité venait à être approuvée puis déployée.

4.2.2.2 Nocivité radiologique liée à l'exposition interne

La nocivité radiologique associée à l'exposition interne s'apprécie selon deux sous-indicateurs complémentaires.

Le **sous-indicateur n°2** porte sur la **radiotoxicité interne par ingestion**, calculée selon la formule [C] et exprimée en Sv/g. Comme évoqué au paragraphe 4.1.2.1, le principe est de définir un sous-indicateur qui ne dépende que des caractéristiques propres aux radionucléides contenus dans le colis de déchets radioactifs. La radiotoxicité potentielle par ingestion répond à ce critère puisqu'elle repose uniquement sur l'activité des radionucléides présents dans le colis de déchets radioactifs et les coefficients de dose par ingestion correspondants. L'activité est normalisée à 1 gramme de colis de déchets radioactifs pour garantir une comparaison homogène entre les différents colis (cf. 4.1.2.2).

$$[C] \quad Rad\ Tox_{ing_{RN}} = \sum_{RN} [Activité\ massique_{RN} \times Coeff\ Dose_{ing_{RN}}]$$

Avec :

- *Activité massique_{RN}*, l'activité du radionucléide contenu dans 1 gramme de colis de déchets radioactifs (en Bq/g) ;
- *Coef Dose_{ing RN}*, le coefficient de dose associé à l'ingestion du radionucléide (en Sv/Bq).

Dans la même logique, le **sous-indicateur n°3** cible la **radiotoxicité interne par inhalation** évaluée selon la formule [D] et exprimée en Sv/g.

$$[D] \quad Rad\ Tox_{inh_{RN}} = \sum_{RN} [Activité\ massique_{RN} \times Coeff\ Dose_{inh\ RN}]$$

Avec :

- *Activité massique_{RN}*, l'activité du radionucléide contenu dans 1 gramme de colis de déchets radioactifs (en Bq/g);
- *Coef Dose_{inh RN}*, le coefficient de dose associé à l'inhalation du radionucléide sous forme d'aérosol (forme la plus pénalisante recommandée par l'arrêté du 16/11/2023¹⁵) (en Sv/Bq).

Ces deux sous-indicateurs sont calculés aux différentes échéances temporelles listées précédemment (cf. 4.1.3).

4.2.3 Sous-indicateurs de nocivité chimique vis-à-vis de l'être humain

Les sous-indicateurs de nocivité chimique vis-à-vis de l'être humain ont été construits avec l'appui de l'Ineris, en recherchant la cohérence avec les sous-indicateurs proposés pour le volet radiologique (cf. paragraphe 4.2.2). Les indicateurs habituellement utilisés pour évaluer l'exposition interne aux substances chimiques sont le quotient de danger (QD) pour les substances à seuil¹⁶, et l'Excès de Risque Individuel (ERI) pour les substances sans seuil¹⁷ [11]. De manière à réduire au maximum le nombre de paramètres d'entrée et rester cohérent avec la méthode mise en œuvre pour la nocivité radiologique, il est proposé d'adopter le QD et l'ERI comme sous-indicateurs de « *chimiotoxicité à seuil et sans seuil* ».

Le nom de ces sous-indicateurs souligne ainsi, qu'en l'absence de tout paramètre réaliste, seuls les potentiels de danger chimique sont traduits. En effet, comme le montrent les formules ci-dessous [E] [F] [G] [H], les équations aux dimensions ne sont pas toujours respectées : elles ont été définies pour illustrer des potentiels de danger et non pour évaluer le risque dans l'absolu.

Dans ce cadre, quatre sous-indicateurs complémentaires de nocivité chimique ont été définis.

¹⁵ Arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

¹⁶ Il s'agit de substances pour lesquelles il existe une dose en dessous de laquelle aucun effet nocif n'est observé.

¹⁷ Il s'agit de substances pour lesquelles tout niveau d'exposition, même infime, présente un risque d'apparition d'effet, notamment cancérigène.

Deux sous-indicateurs sont dédiés à la nocivité chimique liée à l'ingestion :

- **Sous-indicateur n°4, chimiotoxicité à seuil par ingestion** évaluée selon la formule [E] et est adimensionnel ;
- **Sous-indicateur n°5, chimiotoxicité sans seuil par ingestion** calculée selon la formule [F] et est adimensionnel.

$$[E] \quad \text{Chimiotox seuil}_{ing} = \sum_{subs} \left[\frac{\text{Fraction massique}_{subs}}{VTRing_{AS_{subs}}} \right]$$

$$[F] \quad \text{Chimiotox sans seuil}_{ing} = \sum_{subs} [\text{Fraction massique}_{subs} \times VTRing_{SS_{subs}}]$$

Avec :

- *Fraction massique_{subs}*, la masse de la substance contenue dans 1 gramme (ou 1000 milligrammes) de colis de déchets radioactifs (adimensionnelle) ;
- *VTRing_{AS, subs}*, Valeur Toxicologique de Référence ingestion à seuil (en mg/(kg.j)¹⁸) ;
- *VTRing_{SS, subs}*, Valeur Toxicologique de Référence ingestion sans seuil, aussi appelée excès de risque unitaire (ERU) (en (mg/(kg.j))⁻¹).

Les deux autres sous-indicateurs visent quant à eux la nocivité chimique par inhalation :

- **Sous-indicateur n°6, chimiotoxicité à seuil par inhalation** évaluée selon la formule [G] et est adimensionnel ;
- **Sous-indicateur n°7, chimiotoxicité sans seuil par inhalation** calculée selon la formule [H] et est adimensionnel.

$$[G] \quad \text{Chimiotox seuil}_{inh} = \sum_{subs} \left[\frac{\text{Fraction massique}_{subs}}{VTRinh_{AS_{subs}}} \right]$$

$$[H] \quad \text{Chimiotox sans seuil}_{inh} = \sum_{subs} [\text{Fraction massique}_{subs} \times VTR_{SS_{subs}}]$$

Avec :

- *Fraction massique_{subs}*, la masse de la substance contenue dans 1 gramme (ou 1000 milligrammes) de colis de déchets radioactifs (adimensionnel) ;
- *VTRinh_{AS, subs}*, Valeur Toxicologique de Référence inhalation à seuil (en mg/m³) ;
- *VTRinh_{SS, subs}*, Valeur Toxicologique de Référence inhalation sans seuil, aussi appelée excès de risque unitaire (ERU) (en (mg/m³)⁻¹).

Comme pour la nocivité radiologique, la nocivité chimique est appréciée d'après la quantité de substances chimiques rapportée à 1 gramme de colis de déchets radioactifs. Seules les substances chimiques contenues dans le déchet radioactif sont prises en compte dans le calcul, en excluant donc celles potentiellement présentes dans les éléments constitutifs du colis de déchets (i.e., matrice, matériaux de remplissage, enveloppe). Les calculs de sensibilité réalisés ont en effet montré que l'influence des substances apportées par le conditionnement sur la nocivité chimique globale reste limitée (cf. Annexe présentée en chapitre 10).

¹⁸ Kg de masse corporelle

Par ailleurs, les échanges avec l'Ineris ont confirmé la pertinence de retenir des VTR associées aux expositions chroniques, celles-ci étant les plus disponibles dans la littérature. Les tests d'application de la méthode proposée ici révèlent toutefois des données manquantes ne permettant pas une appréciation complète de la nocivité chimique (cf. section 4.4 et chapitre 7).

4.3 Appréciation de la nocivité vis-à-vis de la faune/flore

4.3.1 Présentation de la situation d'exposition retenue

La cible de protection faune/flore englobe l'ensemble des organismes vivants dans les écosystèmes, en interaction avec les milieux eau, air et sol. L'écosystème aquatique est aujourd'hui le mieux caractérisé sur le plan écotoxicologique et dispose donc du plus grand nombre de données de référence. C'est pourquoi, pour apprécier de la manière la plus exhaustive possible les enjeux relatifs à la faune/flore, l'écosystème aquatique continental a été retenu comme milieu d'étude.

Sur cette base, une situation d'exposition a été construite à partir d'une dilution normalisée : 1 gramme de colis de déchets radioactifs est dilué dans 1 litre d'eau douce. L'ensemble des substances chimiques et des radionucléides contenus dans le colis de déchets radioactifs est alors considéré comme dilué dans ce milieu. Comme évoqué précédemment, aucun paramètre extérieur - telles que les propriétés hydrodispersives - n'est intégré. Cette situation permet donc d'approcher les potentiels de nocivité radiologique et chimique, sans pour autant conduire à des évaluations absolues.

Comme pour l'être humain, la nocivité radiologique vis-à-vis de la faune/flore implique deux types d'exposition : interne et externe. Pour la nocivité chimique, c'est une exposition globale du milieu aquatique qui est retenue.

Le Tableau 2 résume les situations d'exposition prise en compte pour apprécier la nocivité radiologique et chimique vis-à-vis de la faune/flore.

Tableau 2 : Situations d'exposition prises en compte pour apprécier la nocivité radiologique et chimique vis-à-vis de la faune/flore

 Nocivité radiologique	Exposition externe de la faune/flore aquatique à la suite de la dilution d'1 gramme de colis dans 1 litre d'eau douce	
	Exposition interne de la faune/flore aquatique à la suite de la dilution d'1 gramme de colis dans 1 litre d'eau douce	
 Nocivité chimique	Exposition de la faune/flore aquatique à la suite de la dilution d'1 gramme de colis dans 1 litre d'eau douce	

4.3.2 Sous-indicateurs de nocivité radiologique vis-à-vis de la faune/flore

Sur la base des situations d'exposition présentées au paragraphe précédent, deux sous-indicateurs de nocivité radiologique vis-à-vis de la faune/flore sont définis. Elaborés en cohérence avec les sous-indicateurs de nocivité radiologique pour l'être humain (cf. paragraphe 4.2.2), ces sous-indicateurs s'appuient sur les principes d'évaluation développés depuis de nombreuses années en radioprotection de l'environnement [12].

Le **sous-indicateur n°8** cible ainsi la **radioécotoxicité externe** et cherche à apprécier l'exposition externe des organismes aquatiques présents dans leur milieu à la suite de la dilution instantanée d'1 gramme de colis de déchets radioactifs dans 1 litre d'eau douce. Il s'exprime en $\mu\text{Gy/h}$. Pour l'exposition externe, les calculs ont montré que l'organisme aquatique le plus affecté est le phytoplancton. Le sous-indicateur de radioécotoxicité potentielle externe s'exprime ainsi selon la formule [I].

$$[I] \quad \text{Radioécotox}_{\text{externe}} = \sum_{RN} \left[\text{Activité massique}_{RN} \times \text{facteur dilution} \times DCC_{\text{ext}_{\text{phytoplancto}}, RN} \right]$$

Avec :

- *Activité massique_{RN}*, l'activité du radionucléide contenu dans 1 gramme de colis de déchets radioactifs (en Bq/g) ;
- *Facteur dilution*, le facteur de dilution à savoir 1 gramme de colis dans 1 litre d'eau douce (en g/L) ;
- *DCC_{ext phytoplancto RN}*, le coefficient de dose externe associé au radionucléide étudié pour le phytoplancton (en $\mu\text{Gy.h}^{-1}/\text{Bq.L}^{-1}$).

Le **sous-indicateur n°9** vise quant à lui la **radioécotoxicité interne** ($\mu\text{Gy/h}$). Il s'évalue selon la formule [J] et cherche à refléter les potentiels de dangers associés à l'exposition interne de la faune/flore aquatique. A noter que pour l'exposition interne, les calculs ont montré que l'organisme aquatique le plus affecté est le mammifère. Le sous-indicateur de radioécotoxicité potentielle interne s'exprime donc selon la formule [J].

$$[J] \quad \text{Radioécotox}_{\text{interne}} = \left[\frac{\text{Activité massique}_{RN} \times \text{facteur dilution}}{\times \text{facteur transfert}_{\text{mam}, RN} \times DCC_{\text{int}_{\text{mam}}, RN}} \right]$$

Avec :

- *Activité massique_{RN}*, l'activité du radionucléide contenu dans 1 gramme de colis de déchets radioactifs (en Bq/g) ;
- *Facteur dilution*, le facteur de dilution à savoir 1 gramme de colis dans 1 litre d'eau douce (en g/L) ;
- *Facteur transfert_{mam, RN}*, le facteur de transfert au mammifère correspondant au radionucléide étudié (en $\text{Bq.kg}^{-1}/\text{Bq.L}^{-1}$) ;
- *DCC_{int mam RN}*, le coefficient de dose interne associé au radionucléide étudié pour le mammifère (en $\mu\text{Gy.h}^{-1}/\text{Bq.kg}^{-1}$).

Ces deux sous-indicateurs sont calculés aux différentes échéances temporelles listées au paragraphe 4.1.3.

4.3.3 Sous-indicateurs de nocivité chimique vis-à-vis de la faune/flore

En s'appuyant sur la situation définie au paragraphe 4.3.1, la nocivité chimique vis-à-vis de la faune/flore est appréciée à travers le **sous-indicateur n°10**, qui reflète la **chimio-écotoxicité**. Ce sous-indicateur est adimensionnel et calculé selon les principes classiques de l'écotoxicité [13], avec une nouvelle fois une simplification des paramètres d'entrée. La formule [K] détaille le calcul du potentiel d'écotoxicité.

$$[K] \quad \text{Chimio écotoxicité} = \sum_{\text{subs}} \left[\frac{(\text{Fraction massique}_{\text{subs}} \times \text{facteur dilution})}{PNEC_{\text{subs}}} \right]$$

Avec :

- *Fraction massique_{subs}*, la masse de la substance chimique contenue dans 1 gramme (ou 1000 milligrammes) de colis de déchets radioactifs (adimensionnel) ;
- *Facteur dilution*, le facteur de dilution à savoir 1 gramme (ou 1000 milligrammes) de colis dans 1 litre d'eau douce (en mg/L) ;
- *PNEC_{subs}*, concentration prédite sans effet pour la substance chimique (mg/L).

4.4 Exemples d'application

Pour valider les sous-indicateurs visant à apprécier au mieux la nocivité chimique et radiologique vis-à-vis de l'être humain et/ou de la faune/flore, une série de tests a été menée sur des colis de déchets radioactifs appartenant aux différentes catégories : HA, MA-VL, FA-VL, FMA-VC et TFA. Ces premiers résultats ont permis de vérifier la robustesse des sous-indicateurs et d'identifier leurs atouts et limites.

Les paragraphes suivants présentent quelques exemples d'application extraits de ces premiers tests.

4.4.1 Présentation des colis étudiés

Dans la suite de ce rapport, les sous-indicateurs de nocivité sont illustrés à l'aide de différents colis de déchets radioactifs. Ces colis ont été sélectionnés pour couvrir au mieux la variabilité des niveaux de nocivité entre les différentes catégories de déchets radioactifs. Ils permettent ainsi d'illustrer l'évolution des sous-indicateurs d'une catégorie à l'autre et de donner une vision globale de l'applicabilité de la démarche développée. Plus précisément, les colis associés aux catégories HA, MA-VL et FA-VL sont choisis pour être illustratifs des niveaux de nocivité rencontrés pour ces trois catégories. En revanche, pour les catégories FMA-VC et TFA, les colis de déchets radioactifs retenus sont ceux pour lesquels l'évaluation des sous-indicateurs est la plus complète, de manière à offrir une vision aussi exhaustive que possible de la méthode développée. Ces colis ne sont donc pas nécessairement illustratifs des niveaux de nocivité observés couramment au sein des catégories FMA-VC et TFA.

Au total, 9 colis de déchets radioactifs ont été retenus et se répartissent de la manière suivante :

- un colis associé à la catégorie HA et appartenant à la typologie des déchets vitrifiés (nommé « *colis HA* ») ;
- deux colis associés à la catégorie MA-VL et appartenant à des typologies de déchets compactés et de déchets bitumés (nommés « *colis MA-VL 1* », « *colis MA-VL 2* ») ;
- deux colis associés à la catégorie FA-VL et appartenant à des typologies de déchets radifères et de déchets graphites (nommés « *colis FA-VL 1* » et « *colis FA-VL 2* ») ;
- deux colis associés à la catégorie FMA-VC contenant des déchets issus de l'exploitation des installations nucléaires comme des résines échangeuses d'ions assurant l'épuration de circuits d'eau ou des concentrats issus du traitement d'effluents usés (nommés « *colis FMA-VC 1* » et « *colis FMA-VC 2* ») ;
- deux colis associés à la catégorie TFA contenant des déchets issus de l'exploitation ou du démantèlement des installations nucléaires comme des déchets métalliques ou des résines échangeuses d'ions (nommé « *colis TFA 1* » et « *colis TFA 2* »).

4.4.2 Résultats associés aux sous-indicateurs de nocivité vis-à-vis de l'être humain

Les paragraphes suivants illustrent les résultats associés aux sous-indicateurs de nocivité vis-à-vis de l'être humain pour les 9 colis de déchets radioactifs retenus, en distinguant les composantes radiologique et chimique. Pour plus de lisibilité, les résultats présentés ont été normalisés par rapport au niveau de nocivité le plus élevé pour chaque sous-indicateur¹⁹. Ces sous-indicateurs n'ont en effet qu'une valeur relative, et cette normalisation renforce la comparabilité des colis de déchets radioactifs entre eux.

4.4.2.1 Composante radiologique vis-à-vis de l'être humain

Trois sous-indicateurs de nocivité radiologique vis-à-vis de l'être humain ont été définis (cf. paragraphe 4.2.2). Les Figure 1 à Figure 3 présentent les résultats associés à ces sous-indicateurs à T0.

¹⁹ Pour chacun des sous-indicateurs, les valeurs de nocivité des 9 colis ont été rapportées à la valeur de nocivité maximale observée parmi ces colis. Les valeurs obtenues sont ainsi réparties entre 0 et 1, où 1 correspond au colis présentant le niveau de nocivité le plus élevé pour le sous-indicateur considéré. Plus la valeur d'un colis est proche de 1, plus son niveau de nocivité est élevé relativement aux autres colis évalués.

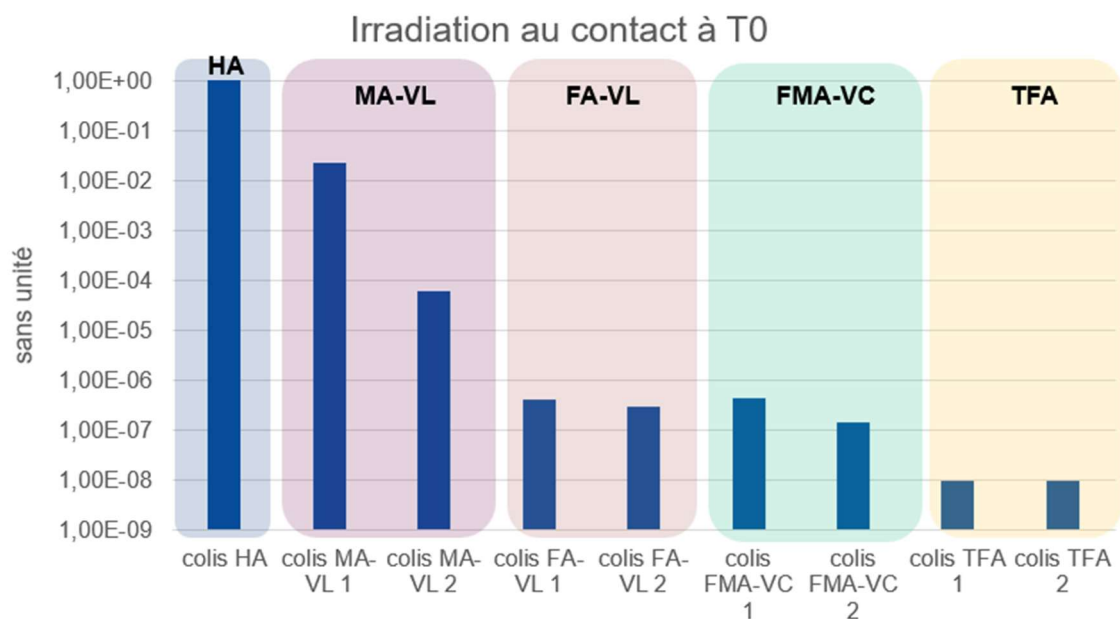


Figure 1 : Résultats associés au sous-indicateur n°1 – Irradiation au contact à T0

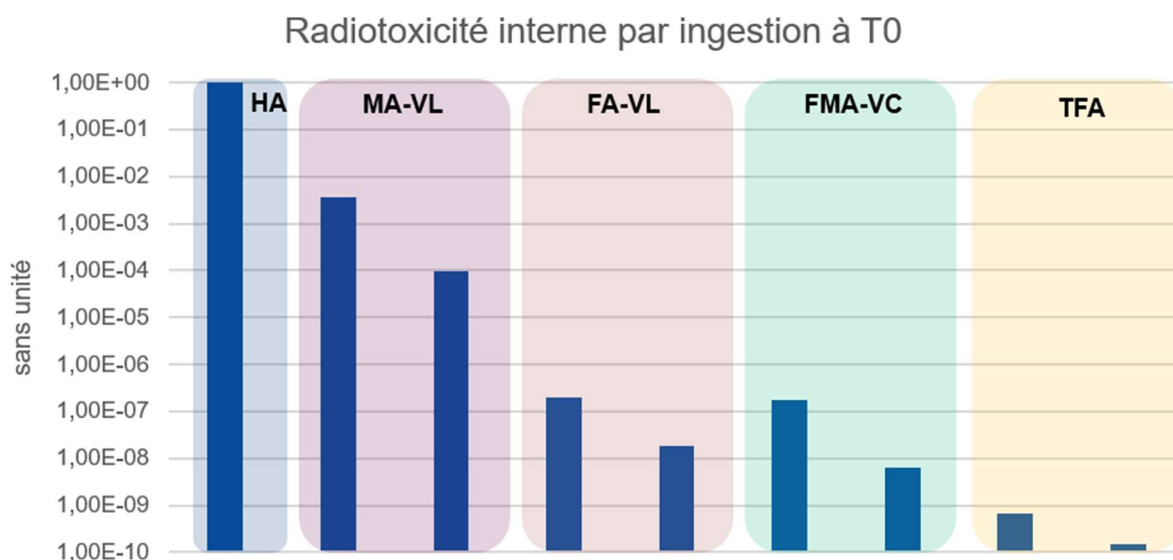


Figure 2 : Résultats associés au sous-indicateur n°2 - Radiotoxicité interne par ingestion à T0

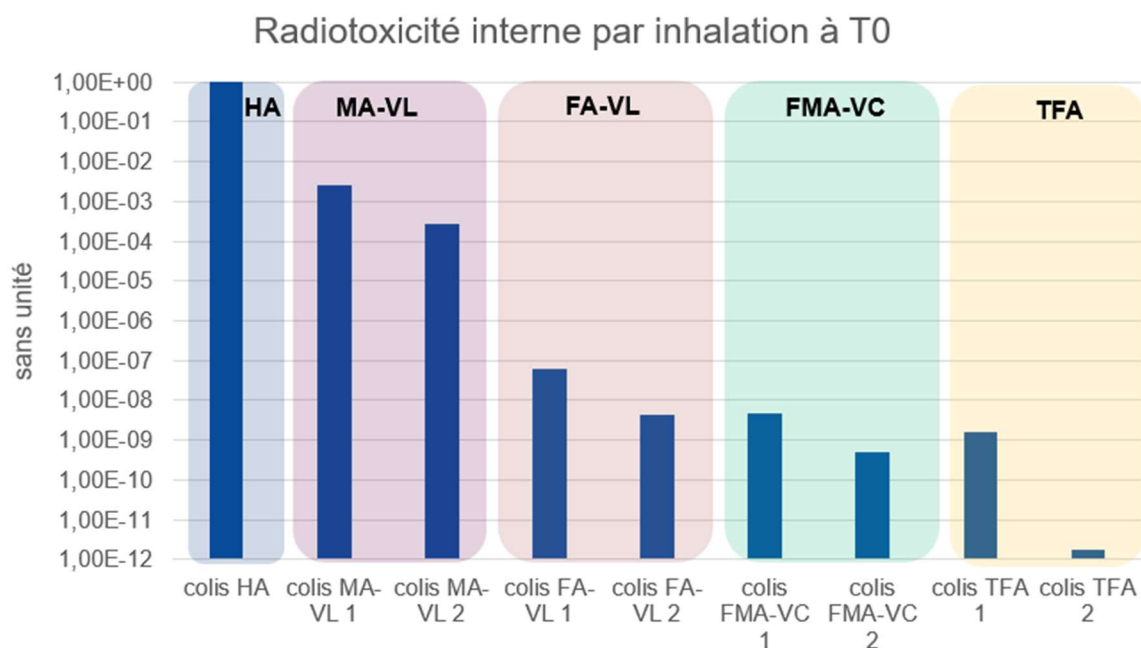


Figure 3 : Résultats associés au sous-indicateur n°3 - Radiotoxicité interne par inhalation à T0

Les résultats associés aux sous-indicateurs de nocivité radiologique vis-à-vis de l'être humain obtenus pour les différents colis sont généralement concordants avec la classification des déchets radioactifs HA, MA-VL, FA-VL, FMA-VC et TFA. Au sein d'une même catégorie, les valeurs des sous-indicateurs peuvent toutefois varier de 1 à 3 ordres de grandeur ; c'est notamment le cas des colis associés à la catégorie TFA. Par ailleurs, le colis FMA-VC 1 présente des niveaux d'irradiation et de radiotoxicité interne équivalents ou supérieurs à ceux des colis FA-VL 1 et FA-VL 2. En effet, à T0, les colis de la catégorie FMA-VC peuvent présenter des activités radiologiques plus élevées que celles des colis de la catégorie FA-VL.

L'évolution des résultats en intégrant la dimension temporelle et donc, la décroissance radioactive, a également été étudiée. A titre d'illustration, des exemples de résultats obtenus pour une typologie de colis par catégorie HA, MA-VL, FA-VL, FMA-VC et TFA sont présentés en Figure 4 et Figure 5. Ces résultats ciblent les sous-indicateurs de radiotoxicité interne par ingestion et inhalation.

Evolution temporelle de la radiotoxicité interne par ingestion

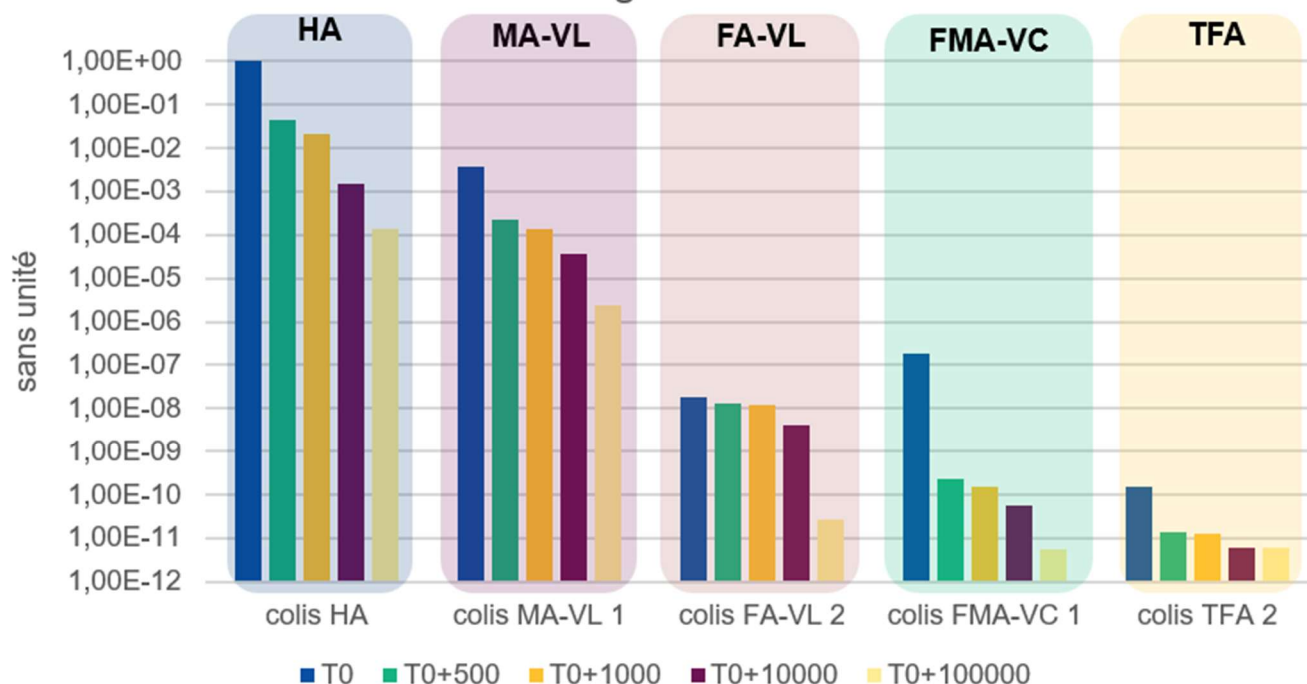


Figure 4 : Evolution temporelle de la radiotoxicité interne par ingestion

Evolution temporelle de la radiotoxicité interne par inhalation

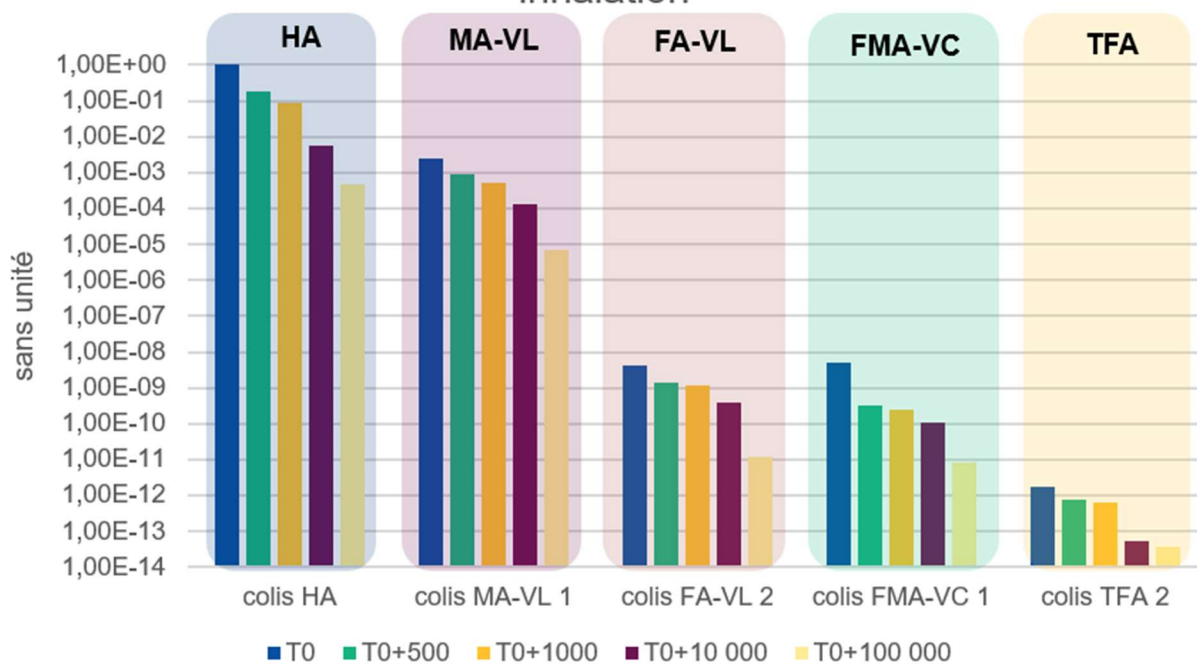


Figure 5 : Evolution temporelle de la radiotoxicité interne par inhalation

La décroissance radioactive entraîne une diminution des niveaux de nocivité radiologique au cours du temps, pouvant atteindre, dans le présent exemple de la radiotoxicité interne, jusqu'à 3 ordres de grandeur entre T0 et T0+100 000 ans pour certains colis de déchets radioactifs. Lorsqu'on poursuit la comparaison entre les colis associés aux catégories de déchets radioactifs FA-VL et FMA-VC, on remarque que le colis FA-VL 2 présente une radiotoxicité interne qui dépasse celle du colis FMA-VC 1 dès T0+500 ans. Ceci reflète la contribution des radionucléides à vie longue, caractéristiques de la catégorie de déchets radioactifs FA-VL.

4.4.2.2 Composante chimique vis-à-vis de l'être humain

Pour ce qui concerne la nocivité chimique vis-à-vis de l'être humain, quatre sous-indicateurs de nocivité ont été définis (cf. paragraphe 4.2.3). Les résultats associés à ces sous-indicateurs sont présentés de la Figure 6 à la Figure 9.

A noter que pour certains colis de déchets radioactifs, l'absence de VTR n'a pas permis d'apprécier la nocivité chimique de certaines substances. Dans ces cas particuliers, la mention NA pour « *non applicable* » est précisée et indique que la nocivité des substances chimiques déclarées pour le colis de déchets radioactifs à l'étude n'a pas pu être évaluée par manque de VTR.

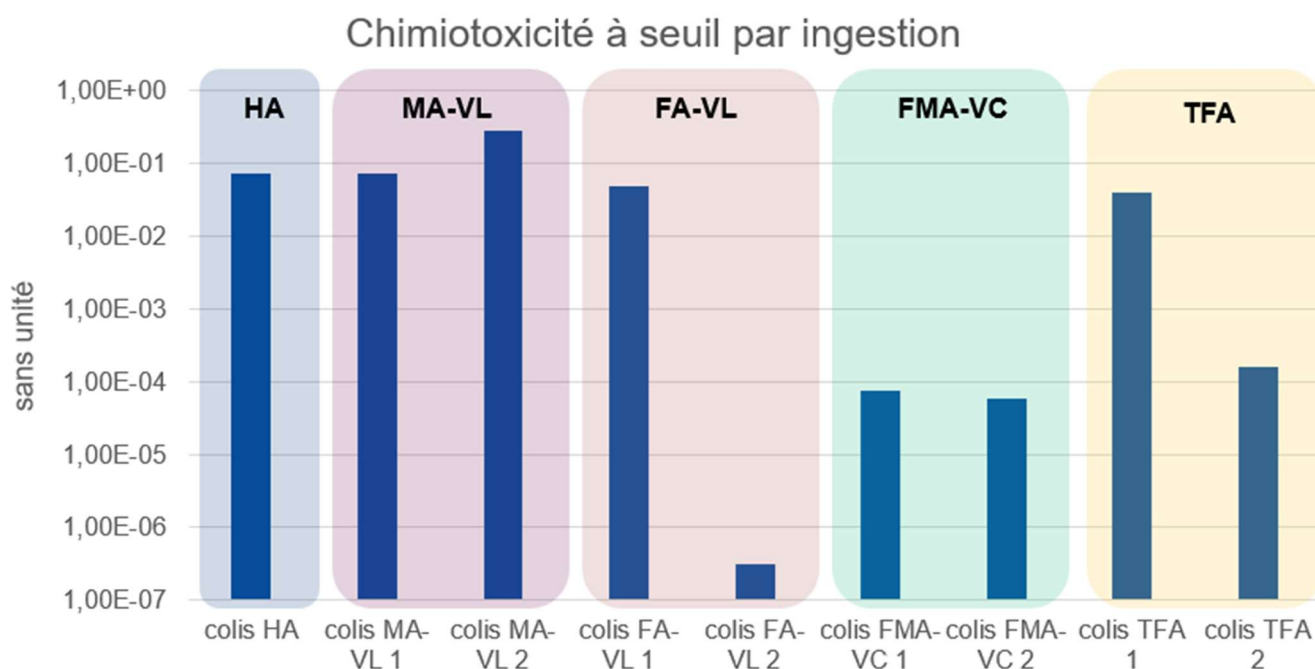


Figure 6 : Résultats associés au sous-indicateur n°4 - Chimiotoxicité à seuil par ingestion

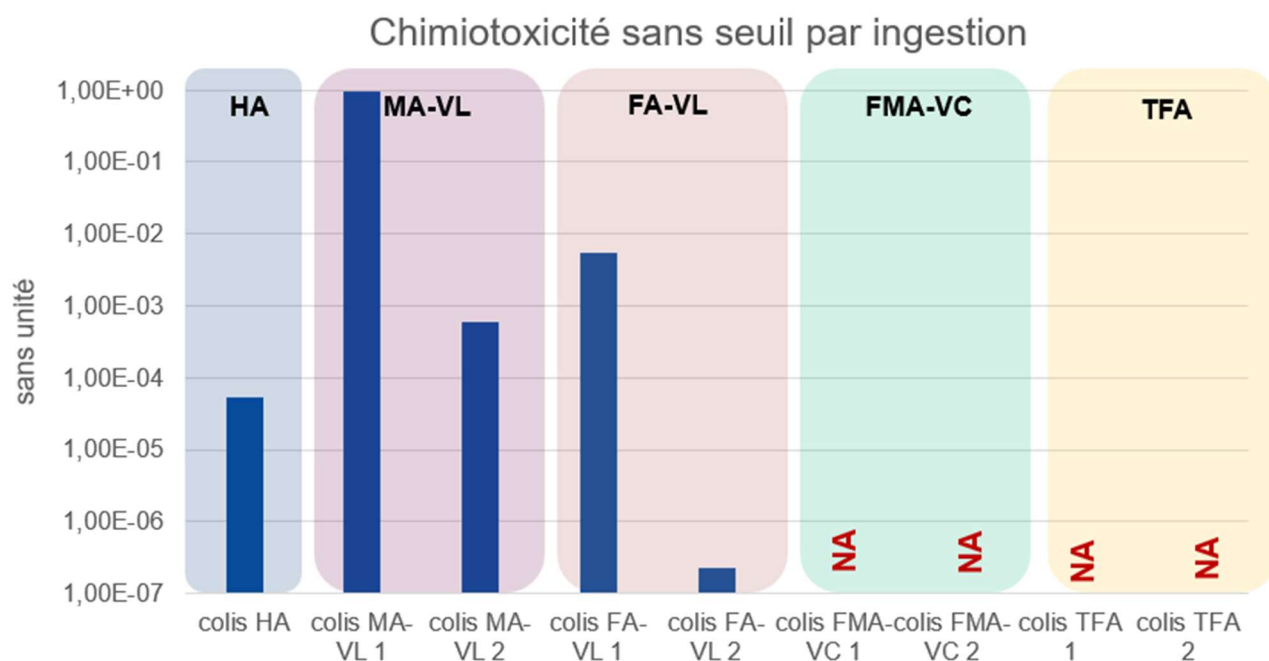


Figure 7 : Résultats associés au sous-indicateur n°5 - Chimiotoxicité sans seuil par ingestion

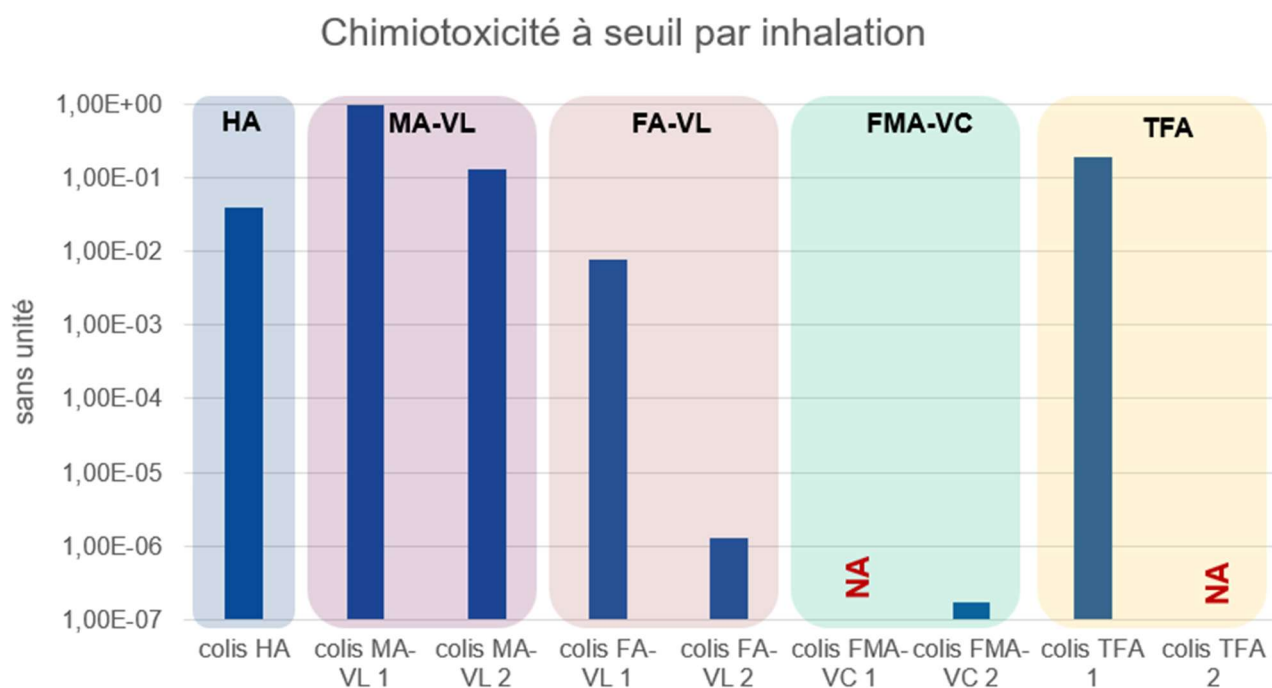


Figure 8 : Résultats associés au sous-indicateur n°6 - Chimiotoxicité à seuil par inhalation

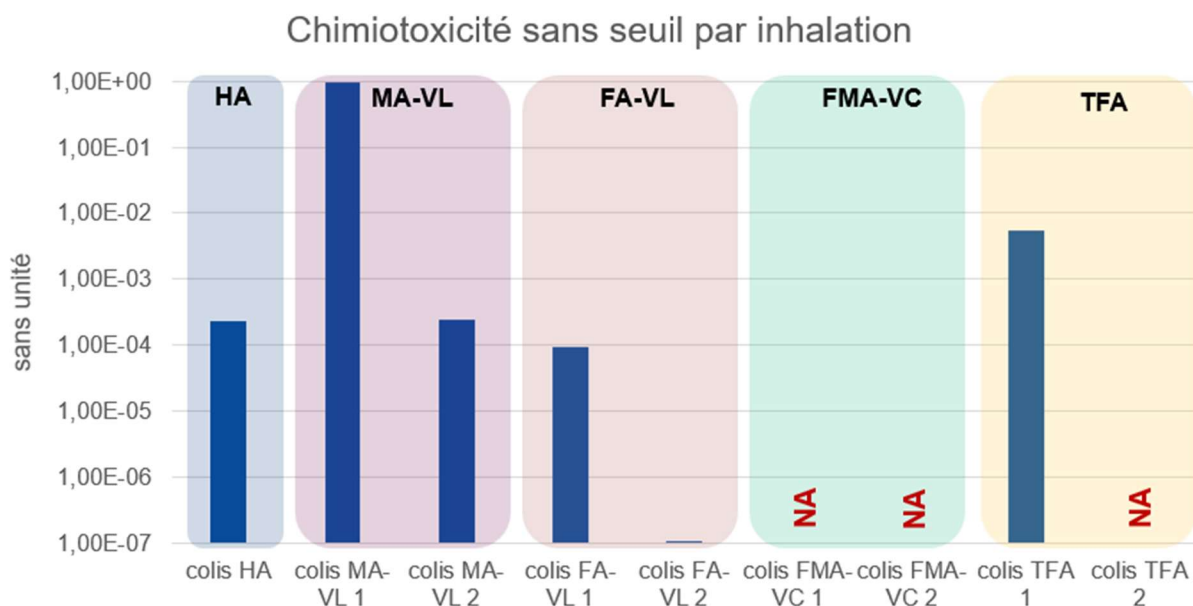


Figure 9 : Résultats associés au sous-indicateur n°7 – Chimiotoxicité sans seuil par inhalation

Contrairement aux sous-indicateurs de nocivité radiologique, les sous-indicateurs de nocivité chimique ne sont pas particulièrement corrélés aux catégories de déchets radioactifs. Pour trois des quatre sous-indicateurs, le colis de déchets MA-VL 1 est celui qui présente le niveau de nocivité le plus élevé. Cela s'explique par la teneur en chrome (supposé être à la valence VI de façon conservative) contenue dans ce colis, et qui contribue significativement à la chimiotoxicité.

Par ailleurs, les sous-indicateurs de chimiotoxicité à seuil et sans seuil conduisent à des classements sensiblement différents, ce qui est sans surprise puisqu'il s'agit de deux sous-indicateurs reflétant deux typologies de substances chimiques aux effets et mécanismes bien distincts.

Enfin, il convient de noter que les colis FMA-VC 1, FMA-VC 2, TFA 1 et TFA 2 n'ont pas toujours pu être évalués en l'absence de VTR correspondantes aux substances chimiques déclarées dans ces colis.

4.4.3 Résultats associés aux sous-indicateurs de nocivité vis-à-vis de la faune/flore

Les paragraphes suivants sont consacrés aux résultats des sous-indicateurs de nocivité envers la faune/flore, toujours selon les composantes radiologique et chimique. Comme pour l'être humain (cf. paragraphe 4.4.2), les valeurs ont été normalisées par rapport au niveau de nocivité le plus élevé estimé pour chaque sous-indicateur¹⁹.

4.4.3.1 Composante radiologique vis-à-vis de la faune/flore

Les deux sous-indicateurs de nocivité radiologique vis-à-vis de la faune/flore ont été définis au paragraphe 4.3.2. Les résultats à T0 associés à ces deux sous-indicateurs sont présentés en Figure 10 et Figure 11.

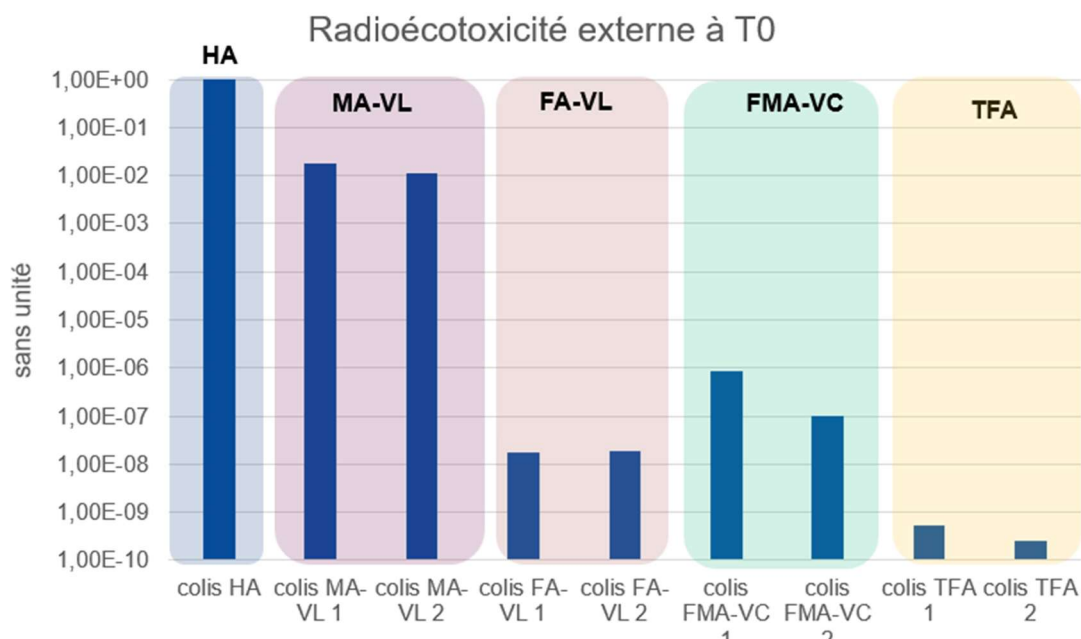


Figure 10 : Résultats associés au sous-indicateur n°8 – Radioécotoxicité externe à T0

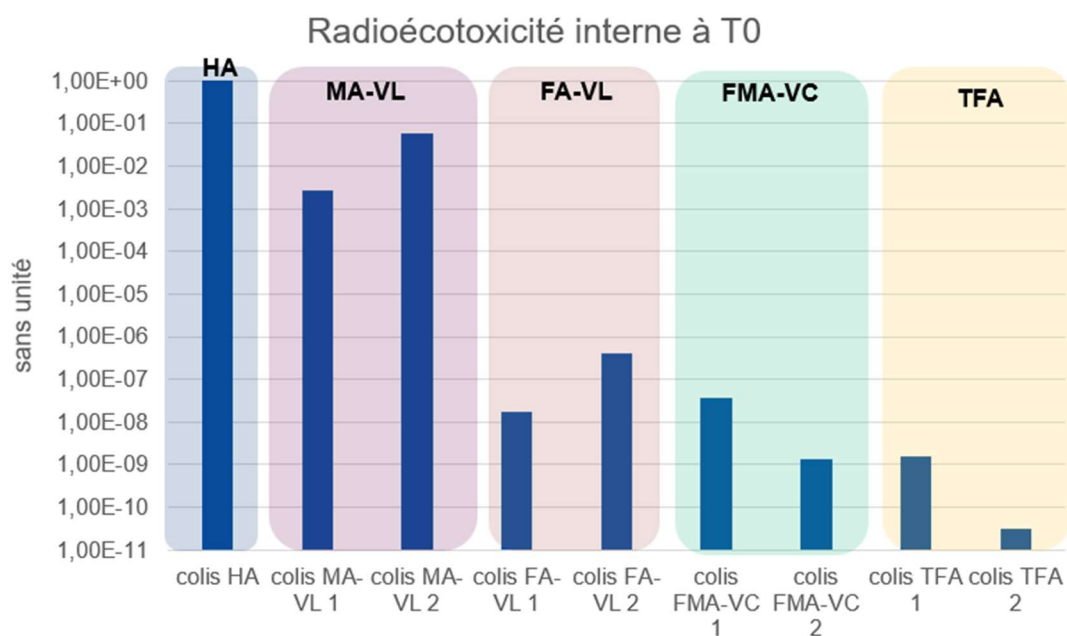


Figure 11 : Résultats associés au sous-indicateur n°9 – Radioécotoxicité interne à T0

Les résultats des sous-indicateurs de radioécotoxicité sont concordants avec le classement par catégorie de déchets radioactifs. Au sein d'une même catégorie, la radioécotoxicité peut varier d'un colis à l'autre, en raison de la diversité des inventaires radiologiques. Par exemple, le colis MA-VL 2 présente un niveau de radioécotoxicité plus élevé que les colis MA-VL 1 car il contient des radionucléides plus nocifs pour l'environnement (e.g., strontium 90 et césium 137).

A titre d'illustration, des exemples de résultats obtenus pour une typologie de colis par catégorie HA, MA-VL, FA-VL, FMA-VC et TFA sont présentés au niveau des Figure 12 et Figure 13.

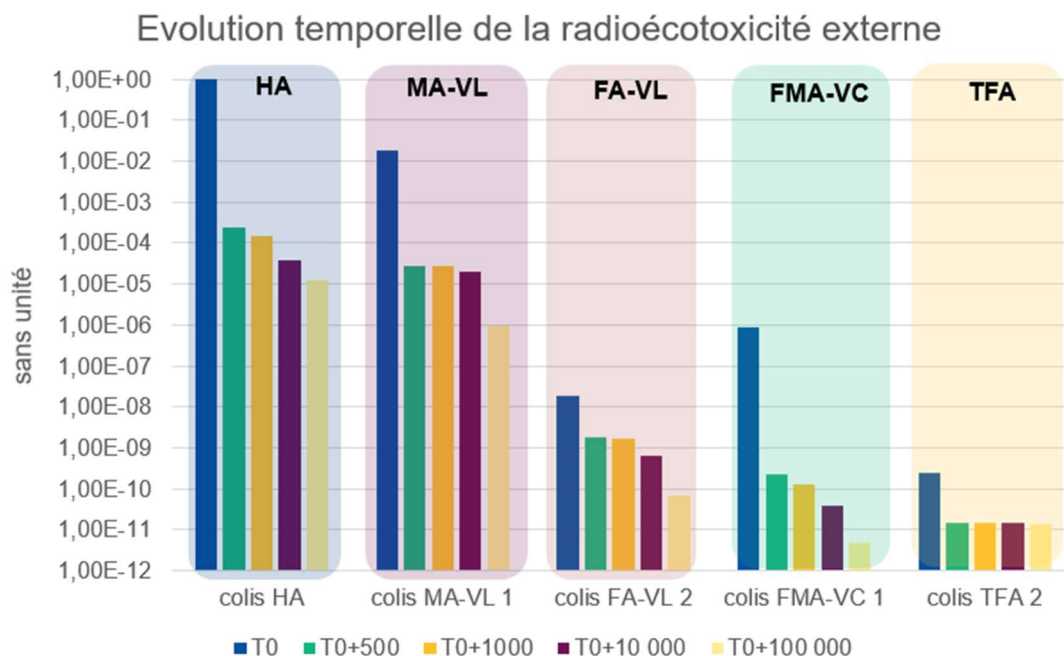


Figure 12 : Evolution temporelle de la radioécotoxicité externe

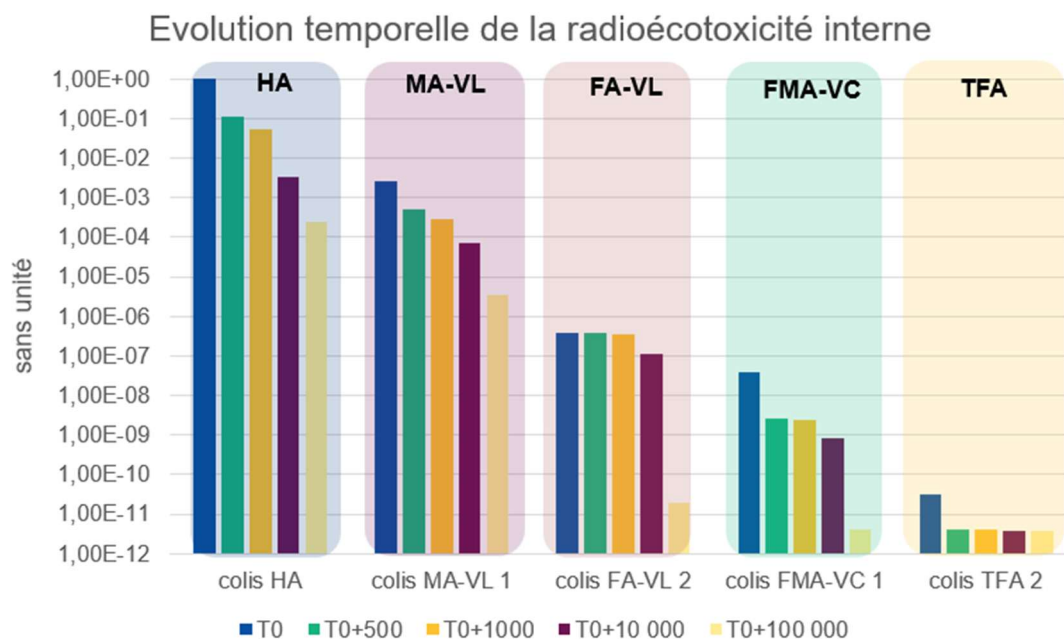


Figure 13 : Evolution temporelle de la radioécotoxicité interne

De manière générale, la décroissance radioactive entraîne une diminution significative des niveaux de radioécotoxicité, pouvant atteindre jusqu'à 5 ordres de grandeur pour certains colis de déchets radioactifs.

4.4.3.2 Composante chimique vis-à-vis de la faune/flore

Les résultats associés au sous-indicateur chimio-écotoxicité sont présentés en Figure 14.

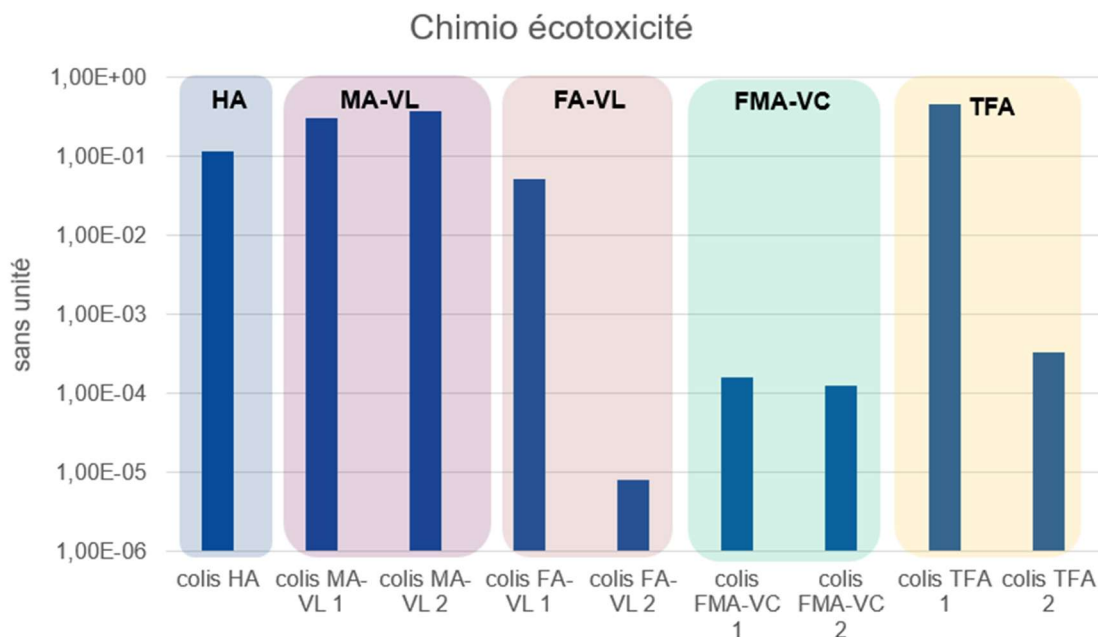


Figure 14 : Résultats associés au sous-indicateur n°10 – Chimio-écotoxicité

Comme pour la chimiotoxicité par ingestion et inhalation vis-à-vis de l'être humain (cf. 4.4.2.2), les résultats de chimio-écotoxicité ne sont pas corrélés aux catégories de déchets radioactifs. Les colis MA-VL 1, MA-VL 2 et TFA 1 présentent la chimio-écotoxicité la plus élevée, en raison de leurs teneurs en chrome et nickel issus de l'acier inoxydable, considérés comme totalement solubles en milieu aquatique. Par ailleurs, ce sous-indicateur s'avère peu discriminant pour les autres typologies de colis de déchets radioactifs présentés en exemple.

4.5 Bilan des sous-indicateurs retenus

Pour couvrir l'ensemble des potentiels de danger associés à un colis de déchets radioactifs, dix sous-indicateurs de nocivité sont proposés au total. Leurs principes sont résumés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Liste des sous-indicateurs de nocivité

Type de nocivité	Sous-indicateurs	Principe	Unité
NOCIVITÉ ENVERS L'ÊTRE HUMAIN	Composante radiologique	n°1 Irradiation	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition externe au contact d'un colis de déchets radioactifs pendant 1 heure Sv/h
		n°2 Radiotoxicité par ingestion	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition interne aux radionucléides par ingestion d'1 gramme de colis de déchets radioactifs Sv/g
		n°3 Radiotoxicité par inhalation	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition interne aux radionucléides par inhalation d'1 gramme de colis de déchets radioactifs Sv/g
	Composante chimique	n°4 Chimiotoxicité à seuil par ingestion	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition interne aux substances chimiques à seuil par ingestion d'1 gramme de colis de déchets radioactifs Sans unité
		n°5 Chimiotoxicité sans seuil par ingestion	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition interne aux substances chimiques sans seuil par ingestion d'1 gramme de colis de déchets radioactifs Sans unité
		n°6 Chimiotoxicité à seuil par inhalation	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition interne aux substances chimiques à seuil par inhalation d'1 gramme de colis de déchets radioactifs Sans unité
		n°7 Chimiotoxicité sans seuil par inhalation	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition interne aux substances chimiques sans seuil par inhalation d'1 gramme de colis de déchets radioactifs Sans unité
NOCIVITÉ ENVERS LA FAUNE/FLORE	Composante radiologique	n°8 Radioécotoxicité externe	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition externe aux radionucléides à la suite d'une dilution d'1 gramme de colis de déchets radioactifs dans 1 litre d'eau douce μGy/h
		n°9 Radioécotoxicité interne	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition interne aux radionucléides à la suite d'une dilution d'1 gramme de colis de déchets radioactifs dans 1 litre d'eau douce μGy/h
	Composante chimique	n°10 Chimio-écotoxicité	Potentiel de nocivité ciblant l'exposition aux substances chimiques à la suite d'une dilution d'1 gramme de colis de déchets radioactifs dans 1 litre d'eau douce Sans unité

Si ces sous-indicateurs permettent de caractériser clairement les différents potentiels de nocivité liés à un colis de déchets radioactifs, leur multiplicité constitue une difficulté pouvant nuire à la compréhension de la méthode développée. D'ailleurs, la question de leur transposition et de leur représentation sous forme d'indicateur global se pose. Le chapitre 6 revient sur ces points, aussi largement débattus dans le cadre du GT Pluraliste [10].

Au-delà du nombre de sous-indicateurs, d'autres limites peuvent être soulevées. Seul le sous-indicateur n°1, relatif à l'irradiation vis-à-vis de l'être humain, correspond à une notion potentiellement familière du public. Les autres sous-indicateurs, fondés sur des situations d'exposition normalisées et non réalistes, puisqu'elles cherchent à se rapprocher au plus près de l'intrinsèque, sont difficilement rattachables à des situations concrètes. Si la force de cette approche est de comparer les potentiels de nocivité des colis de déchets radioactifs entre eux, il convient néanmoins d'admettre que ces potentiels ne peuvent être reliés à des situations réalistes et pourraient s'avérer difficilement compréhensibles par le public.

En effet, l'appréciation de ces potentiels de nocivité au plus près des caractéristiques intrinsèques des colis de déchets radioactifs implique de nombreuses hypothèses simplificatrices, notamment l'abstraction de paramètres tels que les caractéristiques de solubilité, de dispersion ou de bioaccumulation des radionucléides et substances chimiques. Cela conduit, comme mis en évidence aux paragraphes 4.4.2.2 et 4.4.3.2, à amplifier la nocivité de certains colis de déchets radioactifs, alors que dans des conditions plus réalistes, les substances chimiques et radionucléides contributifs ne seraient que peu ou pas mobilisables. Un colis de déchets radioactifs composé d'acier inoxydable en est un exemple parlant puisque dans les situations d'exposition retenues et les hypothèses de mobilisation totale prises en compte, ses potentiels de danger chimique se voient plus élevés que d'autres colis ne comportant pas d'acier inoxydable. Il s'agit pourtant dans la réalité d'un composé peu réactif et faiblement biodisponible dans les conditions usuelles d'exposition.

Par ailleurs, les études d'impact réalisées tout au long du cycle de vie d'un colis de déchets radioactifs (e.g., production, entreposage, transport et stockage) font état d'impacts en général très faibles. Les modes de gestion mis en œuvre visent précisément à empêcher que la nocivité intrinsèque des colis de déchets ne s'exprime. Ce faisant, ces modes de gestion sont adaptés et proportionnés aux caractéristiques de chaque colis de déchets radioactifs, ce qui tend à neutraliser, dans les conditions réelles de gestion, les différences de nocivité intrinsèque observables entre ces colis.

Nonobstant ces limites, les sous-indicateurs ainsi définis tentent de répondre à l'objectif d'informer le public sur les différents potentiels de danger associés aux colis de déchets radioactifs, et *in fine* de les comparer de la manière la plus objective possible. Toutefois, un accompagnement explicatif ainsi qu'une mise en perspective avec les modalités de gestion actuelles et les évaluations d'impacts réalisés par ailleurs resteraient nécessaires si cette démarche se poursuit. A noter cependant qu'un membre du GT Restreint estime qu'aucun accompagnement ne sera en mesure de donner du sens à ces sous-indicateurs. Le chapitre 7 revient sur ce sujet et présente différentes pistes de travail à cet effet.

5. Définition de l'échelle de gradation de la nocivité

Les 10 sous-indicateurs de nocivité tels que définis au chapitre 4 conduisent à présenter des valeurs qui peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur d'un colis à l'autre (cf. section 4.4). Pour en faciliter la lecture et la compréhension, il est nécessaire de traduire ces valeurs numériques sous une forme plus accessible. Une échelle de gradation de la nocivité pourrait permettre de définir des grandes classes de nocivité auxquelles le lecteur pourrait se référer sans avoir à interpréter des valeurs brutes. Elle faciliterait également la comparaison entre sous-indicateurs, offrant ainsi une vision plus synthétique de l'ensemble des enjeux couverts par l'indicateur de nocivité. Toujours pour simplifier encore plus l'information proposée, l'expression des sous-indicateurs radiologique et chimique selon une échelle commune ouvrirait la possibilité de les concaténer entre eux, en ne retenant que le sous-indicateur maximal par exemple.

Le GT Restreint a donc cherché à définir une échelle de gradation répondant à ces objectifs. Ce chapitre en détaille les principes de construction et propose un exemple d'application.

5.1 Les principes de construction de l'échelle de gradation de la nocivité

La construction de l'échelle de gradation de la nocivité implique de définir aussi bien le nombre de niveaux de nocivité que les gammes de nocivité couvertes par chacun d'eux. Pour ce faire, les réflexions se sont appuyées sur les principes ayant guidé la définition des 10 sous-indicateurs relatifs à la nocivité des déchets radioactifs (cf. chapitre 4). Cette échelle de gradation tient compte des deux composantes chimique et radiologique de la nocivité, répond à l'objectif de comparaison des colis de déchets radioactifs entre eux et veille à discriminer autant que possible les différents potentiels de nocivité observés.

5.1.1 Normalisation de l'échelle de gradation de la nocivité

Comme mentionné à la section 4.5, la méthode d'appréciation de la nocivité des déchets radioactifs développée par le GT Restreint repose sur dix sous-indicateurs dont les principes de calcul, et donc les variables et unités, diffèrent les uns des autres. Par conséquent, il est complexe de définir des niveaux de gradation cohérents entre ces sous-indicateurs. Pour pallier cette difficulté, une première approche aurait consisté à construire une échelle dédiée à chaque sous-indicateur, puis tenter de les homogénéiser entre elles. Cette démarche a été jugée trop complexe.

Aussi, le GT Restreint a opté pour une autre stratégie, celle de normaliser l'ensemble des sous-indicateurs pour les ramener à une base commune, en s'affranchissant de la diversité de leurs unités. Pour chacun des dix sous-indicateurs, les résultats obtenus pour les différents colis de déchets étudiés ont été rapportés à ceux d'un colis théorique « max ». Ce colis de référence théorique « max » a été construit en retenant la valeur maximale observée pour chaque sous-indicateur, même si initialement ces valeurs maximales appartiennent à des colis de déchets radioactifs différents.

Cette normalisation permet d'obtenir des résultats adimensionnels compris entre 0 et 1 pour chacun des sous-indicateurs appréciés pour différents colis de déchets radioactifs. Les valeurs proches de 1 correspondent aux niveaux de nocivité les plus élevés, tandis que celles proches de 0 aux niveaux de nocivité les plus faibles. En pratique, les premiers résultats montrent que les valeurs normalisées obtenues couvrent presque 10 ordres de grandeurs, de 10^{-10} à 1.

Il convient de bien avoir en tête que la normalisation permet de positionner chaque colis de déchets radioactifs par rapport au niveau de nocivité maximal observé pour chaque sous-indicateur pris séparément. Cependant, à ce stade, il n'est pas possible de comparer directement les sous-indicateurs entre eux. Cela devient néanmoins possible en définissant une échelle de gradation commune, comme présenté au paragraphe suivant.

5.1.2 Deux échelles distinctes mais homogènes

L'indicateur de nocivité doit intégrer deux cibles de protection - l'être humain et/ou la faune/flore - ainsi que deux composantes : les nocivités chimique et radiologique. Sur cette base, la question du nombre d'échelles de gradation à construire se pose naturellement. Etant donné que, dans l'état des connaissances actuelles, les domaines chimique et radiologique reposent sur des cadres et des modalités d'évaluation très différents, l'agrégation de ces composantes pour aboutir à un seul et unique indicateur n'a pas été retenue par le GT Restreint. Deux échelles de gradation distinctes ont ainsi été définies, l'une pour la nocivité chimique, l'autre pour la nocivité radiologique. D'ailleurs, pour insister sur cette distinction, les deux échelles adoptent des nomenclatures différentes ; l'une est lettrée, tandis que l'autre est chiffrée. Chacune de ces échelles permet alors l'inter-comparaison des sous-indicateurs qui lui sont associés. Les sous-indicateurs de nocivité

radiologique sont comparables entre eux grâce à l'échelle de gradation qui leur est dédiée, de même que les sous-indicateurs de nocivité chimique peuvent être intercomparés grâce à la seconde échelle.

Pour aller plus loin et garantir une cohérence entre ces deux échelles à savoir, s'assurer qu'un niveau donné sur l'échelle radiologique corresponde à une gamme de nocivité équivalente au niveau homologue sur l'échelle chimique, un travail d'homogénéisation a été réalisé.

Ce travail s'est opéré en plusieurs phases.

D'abord, un point d'ancrage commun aux deux échelles (chimique et radiologique) a été choisi pour les mettre en cohérence : un excès de risque de 10^{-5} , qui correspond globalement à l'objectif de protection retenu dans les domaines chimique et radiologique pour définir les valeurs de référence (e.g., limites de dose, Excès de Risque Individuel (ERI)). Ce seuil de 10^{-5} a été traduit en deux marqueurs de référence dédiés à chaque échelle :

- pour la nocivité radiologique, en concordance avec la publication 103 de la CIPR [14], le seuil de 10^{-5} a été traduit par une irradiation au contact de 1 mSv/an (soit $1,2 \cdot 10^{-7}$ Sv/h) ;
- pour la nocivité chimique : le seuil de 10^{-5} a été traduit par une chimiotoxicité sans seuil.

Ces marqueurs de référence ont ensuite été normalisés selon les valeurs du colis de référence théorique « max » ce qui a modifié leurs ordres de grandeur :

- de l'ordre de 10^{-10} pour le marqueur de référence radiologique ;
- de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-6} pour le marqueur de référence chimique²⁰.

Compte tenu de la large gamme de valeurs normalisées observée à savoir près de 10 ordres de grandeur, la borne haute du premier niveau de gradation de nocivité a été fixée 1 à 2 ordres de grandeur au-dessus de ces marqueurs de référence. Le niveau A de l'échelle radiologique et le niveau 1 de l'échelle chimique couvrent donc des valeurs situées dans une gamme couvrant un excès de risque de 10^{-5} mais pouvant toutefois le dépasser d'un à deux ordres de grandeur.

Cela permet de garantir que le premier niveau de gradation des échelles chimique et radiologique intègre bien des enjeux de nocivité équivalents, tout en laissant une marge suffisante pour structurer les niveaux supérieurs devant intégrer l'ensemble des valeurs normalisées observées.

5.1.3 Une attention particulière pour l'objectif de discrimination des résultats

Concernant le nombre de niveaux de nocivité associé à chacune des échelles de gradation, le choix s'est porté sur un nombre pair, de manière à éviter le cas d'un niveau médian souvent synonyme d'un entre-deux peu informatif. Sur la base des colis de déchets radioactifs testés, des échelles à 4, 6 et 8 niveaux ont été explorées. Il en ressort qu'une échelle à 6 niveaux apparaît la plus adaptée pour distribuer les résultats de manière équilibrée entre les différents niveaux de nocivité, sans en surcharger un en particulier. Deux échelles à 6 niveaux ont donc été retenues, l'une pour la nocivité chimique et l'autre pour la nocivité radiologique.

Ces 6 niveaux de nocivité ont ensuite été construits de manière à couvrir l'étendue des ordres de grandeur observés pour les colis de déchets radioactifs évalués. Chaque niveau de ces échelles progresse de deux ordres de grandeurs en deux ordres de grandeur à partir du premier niveau de gradation. C'est ainsi que les plus hauts niveaux de l'échelle de gradation à savoir, le niveau F pour l'échelle radiologique et le niveau 6 pour l'échelle chimique, correspondent à des niveaux de nocivité supérieurs de 8 à 10 ordres de grandeur par rapport à l'excès de risque de 10^{-5} .

L'écart de 10 ordres de grandeur par rapport au seuil de 10^{-5} peut sembler important. Il convient toutefois de rappeler que ce seuil n'a servi qu'à ancrer la construction des deux échelles de manière cohérente : il ne constitue pas une référence d'interprétation en termes de risque. A ce titre, il est important de rappeler que l'indicateur de nocivité ne peut pas être interprété en termes de risque absolu associé à la présence d'un colis de déchets radioactifs. Il reflète les potentiels de danger pouvant s'exprimer théoriquement, sans tenir compte des expositions réelles, qui sont limitées par les dispositions techniques et organisationnelles de sûreté et de radioprotection mises en œuvre à toutes les étapes de leur gestion (traitement éventuel, conditionnement, entreposage, stockage et transports).

²⁰ En fonction du sous-indicateur de chimiotoxicité sans seuil concerné (ingestion ou inhalation), le marqueur de référence, une fois normalisé par rapport à la valeur maximale du sous-indicateur, prend une valeur de 10^{-6} ou 10^{-7} .

Par ailleurs, il convient de souligner que si le point d'ancrage de 10^{-5} a permis d'assurer la cohérence des deux échelles pour la cible de protection être humain, le GT Restreint a supposé que cette cohérence est également pertinente pour la faune/flore.

Enfin, il est important d'avoir en tête que ces niveaux ont été déterminés sur la base d'un échantillon restreint de résultats. Une des pistes éventuelles de travail, présentée au chapitre 7, consisterait, à les consolider à partir d'une analyse statistique plus large.

5.2 Présentation des échelles de gradation des nocivités radiologique et chimique

Sur la base des principes détaillés à la section 5.1 précédente, deux échelles de gradation de la nocivité ont été définies. Le Tableau 4 présente l'échelle de gradation de la nocivité radiologique et le Tableau 5 présente l'échelle de gradation de la nocivité chimique.

Il est important de rappeler que le seuil d'excès de risque de 10^{-5} a servi de point d'ancrage pour construire les échelles de manière cohérente, sans pour autant y figurer comme une borne explicite. Ainsi, la valeur 10^{-5} qui apparaît comme borne supérieure du niveau 1 de l'échelle chimique ne correspond pas au marqueur de référence associé à l'excès de risque de 10^{-5} . Après normalisation, ce marqueur se place en réalité 1 à 2 ordres de grandeur en-dessous de cette borne (cf. 5.1.2).

Toujours au sujet de l'échelle de nocivité chimique, il faut noter que les valeurs normalisées les plus élevées et observées à ce jour, c'est-à-dire les valeurs proches de 1, se situent dans la gamme de nocivité 4. Les gammes de nocivité 5 et 6 correspondent donc à des niveaux de nocivité supérieurs à ceux observés pour les colis de déchets radioactifs actuellement évalués. Cela présente l'avantage d'offrir une marge pour intégrer des colis présentant une chimiotoxicité potentiellement plus élevée en cas de déploiement de l'exercice. En revanche, cela signifie que les résultats actuels se répartissent uniquement entre les gammes de nocivité chimique 1 et 4, sans occuper l'ensemble de l'échelle. Une meilleure discrimination des valeurs pourrait être obtenue en élargissant les gammes associées à chaque niveau, mais cela se ferait au détriment de la cohérence avec l'échelle radiologique. Le GT Restreint a donc fait le choix de conserver l'échelle telle quelle, en privilégiant la cohérence entre les deux échelles sur la représentativité de la distribution des résultats actuels.

Tableau 4 : Echelle de gradation de la nocivité radiologique avec x correspondant au niveau de nocivité des sous-indicateurs radiologiques normalisés au colis théorique « max »

niveau A	$x < 10^{-9}$
niveau B	$10^{-9} \leq x < 10^{-7}$
niveau C	$10^{-7} \leq x < 10^{-5}$
niveau D	$10^{-5} \leq x < 10^{-3}$
niveau E	$10^{-3} \leq x < 10^{-1}$
niveau F	$x \geq 10^{-1}$

Tableau 5 : Echelle de gradation de la nocivité chimique avec x correspondant au niveau de nocivité des sous-indicateurs chimiques normalisés au colis théorique « max »

niveau 1	$x < 10^{-5}$
niveau 2	$10^{-5} \leq x < 10^{-3}$
niveau 3	$10^{-3} \leq x < 10^{-1}$
niveau 4	$10^{-1} \leq x < 10$
niveau 5	$10 \leq x < 10^3$
niveau 6	$x \geq 10^3$

5.3 Exemples d'application

Les résultats associés au test sur les 9 colis de déchets radioactifs et présentés à la section 4.4 ont été transposés selon les échelles de nocivité radiologique et chimique définies précédemment. Le Tableau 6 présente les gammes de nocivité obtenues à T0 et le Tableau 7 celles obtenues à T0+10 000 ans.

Pour le volet radiologique, les gammes de nocivité intermédiaires (de C à E) sont largement représentées à T0. Cela s'explique clairement par les catégories auxquelles appartiennent les colis de déchets radioactifs testés (6 colis MA-VL, FA-VL et FMA-VC). A T0+10 000 ans, les résultats évoluent vers une répartition des gammes de nocivité entre A et C, en lien avec la diminution attendue de la nocivité du fait de la décroissance radioactive. En revanche, aucun colis de déchets radioactifs ne présente des gammes de nocivité chimique supérieures à 4. Cela s'explique par la construction même de l'échelle (cf. paragraphe 5.1.2). Une redistribution de cette échelle pourrait être envisagée, mais cela serait au détriment de la cohérence avec l'échelle de gradation radiologique.

Enfin, l'ensemble des résultats associés à chacun des dix sous-indicateurs amène à présenter une multitude de gammes de nocivité. Bien que ces données soient exprimées dans deux échelles relativement simples, cela peut en limiter la compréhension directe par le public. Néanmoins, et comme avancé précédemment, les échelles radiologique et chimique ont été construites dans l'idée d'exprimer chacune l'ensemble de leurs sous-indicateurs dans une unité commune (de A à F ou de 1 à 6), sans différencier les cibles de protection être humain et faune/flore. A partir de ces échelles de gradation, il est donc pertinent d'explorer des concaténations (e.g., un indicateur de nocivité radiologique globale et un indicateur de nocivité chimique globale). Ces pistes de travail sont discutées dans les chapitres 6 et chapitre 7, et ont également fait l'objet de débats dans le cadre du GT Pluraliste [10].

Tableau 6 : Positionnement à T0 des 9 colis retenus sur les échelles de gradation de la nocivité radiologique et chimique

	ÊTRE HUMAIN							FAUNE/FLORE		
	Radiologique			Chimique				Radiologique		Chimique
	Radiotoxicité interne		Irradiation	Chimiotoxicité ingestion		Chimiotoxicité inhalation		Radioécotoxicité		Chimio-écotoxicité
	ingestion	inhalation		à seuil	sans seuil	à seuil	sans seuil	externe	interne	
Colis HA	F	F	F	3	2	3	2	F	F	4
Colis MA-VL 1	E	E	E	3	4	4	4	E	E	4
Colis MA-VL 2	D	D	D	4	2	4	2	E	E	4
Colis FA-VL 1	C	B	C	3	3	3	2	B	B	3
Colis FA-VL 2	B	B	C	1	1	1	1	B	C	1
Colis FMA-VC 1	C	B	C	3	NA	NA	NA	C	B	2
Colis FMA-VC 2	B	A	C	2	NA	1	NA	C	A	2
Colis TFA 1	A	B	B	3	NA	1	4	A	B	4
Colis TFA 2	A	A	B ²¹	2	NA	NA	NA	A	A	2

Tableau 7 : Positionnement à T0 + 10 000 ans des 9 colis retenus sur les échelles de gradation de la nocivité radiologique et chimique

	ÊTRE HUMAIN							FAUNE/FLORE		
	Radiologique			Chimique				Radiologique		Chimique
	Radiotoxicité interne		Irradiation	Chimiotoxicité ingestion		Chimiotoxicité inhalation		Radioécotoxicité		Chimio-écotoxicité
	ingestion	inhalation		à seuil	sans seuil	à seuil	sans seuil	externe	interne	
Colis HA	E	E	D	3	2	3	2	D	E	4
Colis MA-VL 1	D	D	D	3	4	4	4	D	D	4
Colis MA-VL 2	D	D	B	4	2	4	2	B	D	4
Colis FA-VL 1	B	B	B	3	3	3	2	B	B	3
Colis FA-VL 2	B	A	A	1	1	1	1	A	B	1
Colis FMA-VC 1	A	A	A	3	NA	NA	NA	A	A	2
Colis FMA-VC 2	A	A	A	2	NA	1	NA	A	A	2
Colis TFA 1	A	A	A ²¹	3	NA	1	4	A	A	4
Colis TFA 2	A	A	A ²¹	2	NA	NA	NA	A	A	2

²¹ Valeur obtenue à partir d'un seuil forfaitaire d'un calcul d'approximation.

6. Enjeux de représentation de l'indicateur

Il est rappelé que le mandat du GT Restreint porte essentiellement sur les aspects méthodologiques et techniques de l'appréciation de la nocivité tandis que le GT Pluraliste a pour principal objectif de proposer un indicateur de nocivité compréhensible par le public en définissant les informations à faire porter par cet indicateur et en choisissant sa représentation pour garantir sa lisibilité (cf. section 1.3).

Toutefois, et afin d'opter pour certains choix techniques (i.e., distinction des échelles de nocivité chimique et radiologique, agrégation des sous-indicateurs par cible de protection ou par type de danger, etc.), le GT Restreint a engagé une réflexion sur la représentation graphique d'un indicateur de nocivité destiné à figurer sur les fiches descriptives de l'Inventaire national. Conçu pour être un outil de communication visuelle, cet indicateur doit exprimer de manière claire et accessible la nocivité des matières et déchets radioactifs, tant pour un public averti que pour un lectorat non expert. Le GT Restreint s'est réuni au cours de plusieurs ateliers collaboratifs dédiés à la représentation de l'indicateur et animés par un designer graphique. Ces ateliers ont permis d'explorer puis de structurer progressivement les enjeux scientifiques et graphiques associés à un indicateur de nocivité jusqu'à l'élaboration de deux prototypes présentés en mars 2025 au GT Pluraliste [10]. Ces prototypes ont été un support aux échanges avec le GT Pluraliste.

Les paragraphes suivants dressent une synthèse des premières réflexions menées par le GT Restreint concernant les enjeux de représentation de l'indicateur de nocivité.

6.1 Principes pour la conception d'un indicateur et application à la nocivité

D'une manière générale, un indicateur vise à rendre compte d'une réalité complexe de manière simplifiée et accessible. Il ne peut refléter qu'une partie de cette réalité et doit ainsi être interprété comme tel. Partant de cette définition, le GT Restreint a cherché à nourrir ses réflexions à partir de différents indicateurs existants (e.g., Vigicrues, risques d'avalanche, étiquettes énergie, indice ATMO sur la qualité de l'air, Nutri-Score, DPE). Plusieurs principes ont ainsi été considérés comme structurants pour réfléchir à la représentation de l'indicateur de nocivité :

- être compréhensible par un public non spécialiste ;
- constituer un outil de communication rapide et signifiant ;
- permettre une évaluation rapide du « *niveau relatif de nocivité* » d'un colis de déchets radioactifs ou de matières radioactives ;
- être déclinable en versions imprimée et numérique.

Ces grands principes, mêlant lisibilité et rigueur scientifique, ont guidé les membres du GT Restreint dans leur prise en compte des limites et enseignements pour identifier les composants de l'indicateur de nocivité. Les paragraphes suivants détaillent ces éléments.

La force des codes couleur et leurs limites

Le choix de couleurs a une influence directe sur l'interprétation du message porté par l'indicateur de nocivité. Si des couleurs généralement perçues comme positives (couleur verte par exemple) peuvent laisser croire à une absence de nocivité, des couleurs particulièrement alarmantes (orange, rouge, noir, etc.) présentent quant à elles un caractère anxiogène. Il convient de trouver un équilibre entre impact visuel et teneur de l'information à transmettre.

La nécessité d'une iconographie stable, normée ou inspirée de l'existant

L'indicateur de nocivité adresse plusieurs cibles de protection (être humain et/ou faune/flore) ainsi que plusieurs types de danger (radiologique et chimique). Son iconographie doit donc intégrer toutes ces composantes à l'aide de symboles familiers, qui facilitent la compréhension du public. Tout l'enjeu reste néanmoins de choisir des symboles suffisamment évocateurs pour transmettre fidèlement le message, sans pour autant le minimiser ou le surestimer. Par exemple, représenter la faune/flore par une fleur et une abeille pourrait renvoyer une image trop positive de la biodiversité. A l'inverse, la sélection de symboles en lien avec la mort ou annonçant un danger imminent (e.g., tête de mort, cercueil, squelette) donne une dimension anxiogène à l'indicateur. A nouveau, il s'agit de trouver un équilibre entre la représentation des enjeux et une communication adaptée au public visé.

L'importance de proposer un système évolutif, pouvant s'adapter aux informations disponibles

La lisibilité de l'indicateur requiert des données simples, dans un langage compréhensible par le public. L'indicateur ne peut donc pas comporter un trop grand nombre d'informations à la fois. Ainsi, il est proposé différents niveaux de lecture de l'indicateur, permettant d'évoluer depuis des informations agrégées et simples vers des informations de plus en plus détaillées.

Le besoin d'organiser et de hiérarchiser l'information

La multiplicité des sous-indicateurs (cf. section 4.5) génère un volume d'informations important qu'il convient de structurer. Deux logiques d'organisation peuvent être envisagées : (i) par type de nocivité (chimique et radiologique) ou (ii) par cible de protection (être humain et/ou faune/flore). Cette structure pourrait éventuellement ensuite être présentée sous forme plus détaillée, en affichant les 10 sous-indicateurs de manière individuelle, ou bien être conservée agrégée par cible de protection ou par type de danger.

Par ailleurs, il convient de s'interroger sur la hiérarchie temporelle de la présentation des informations : la nocivité actuelle (T0) semble à privilégier dans un premier niveau de lecture, tandis que l'évolution de la nocivité sur le plus long-terme (de 500 à 100 000 ans) peut être fournie en second niveau.

Des niveaux de gradation neutres et distincts

Il est important de définir des échelles de gradation dont les intitulés de niveaux n'impliquent pas de jugement de valeur, ils sont alors dits neutres. Des qualificatifs tels que négligeable, acceptable ou inacceptable ne sont donc pas retenus.

Par ailleurs, le GT Restreint constate que les méthodes d'évaluation des risques chimique et radiologique étant aujourd'hui pensées différemment, il est nécessaire de définir deux échelles de gradation distinctes abordant séparément la nocivité chimique et la nocivité radiologique. Cette différenciation peut néanmoins interroger le public qui pourrait logiquement s'attendre à un indicateur de nocivité global. Il est toutefois important de ne pas suggérer qu'une agrégation des deux types de nocivité tels qu'évalués aujourd'hui a un sens d'un point de vue scientifique.

Faut-il associer l'indicateur de nocivité à des éléments de comparaison concrets ?

L'indicateur cible la nocivité intrinsèque, permettant une comparaison relative des matières et déchets radioactifs entre eux, sans informer sur les niveaux de nocivité potentiellement observables dans des situations réelles de gestion. Pour apporter davantage de concret et faciliter l'appropriation par le public, une réflexion pourrait être engagée pour déployer l'indicateur de nocivité sur des objets, substances ou risques de la vie courante. Ainsi, la mise en perspective avec le cas de la radioactivité naturelle par exemple pourrait être envisagée.

6.2 Les prototypes d'indicateur de nocivité à partager au GT Pluraliste

L'ensemble des réflexions menées au sein du GT Restreint a permis d'avancer sur les possibilités de représentation de l'indicateur de nocivité, en confrontant les intentions graphiques aux exigences scientifiques, techniques et communicationnelles. Deux prototypes ont été retenus pour être partagés au GT Pluraliste et sont présentées aux Figure 15 à Figure 18.

Le prototype 1 (Figure 15 et Figure 16) propose un indicateur de nocivité dont le premier niveau d'information correspond à la nocivité par type de danger (radiologique/chimique) ou bien par cible de protection (être humain et/ou faune & flore). Les nocivités radiologique et chimique sont appréciées selon deux échelles de gradation distinctes à six niveaux (respectivement de A à F et de 1 à 6). Un même dégradé de couleur est associé à chaque échelle. Ce prototype peut ensuite se décliner pour afficher des informations de plus en plus détaillées. Ainsi, ce prototype 1 peut se présenter au niveau le plus agrégé sous forme d'un tableau simple contenant les deux niveaux de nocivité principaux (radiologique/chimique ou être humain/faune-flore) ou bien sous forme d'un tableau plus complet renseignant les niveaux de nocivité associés aux 10 sous-indicateurs à T0. L'évolution des niveaux de nocivités chimique et radiologique selon les 5 temporalités (T0, T0+500, T0+1000, T0+10000, T0+100000) pourrait aussi être ajoutée au moyen de tableaux supplémentaires.

Le prototype 2 (Figure 17 et Figure 18) reprend quant à lui l'idée du diagramme de type Kiviat proposé dans la méthode IRSN de 2018 [4]. Le diagramme de Kiviat a été conservé malgré les critiques évoquées au chapitre 1, car il offre un premier niveau de lecture structuré autour des 4 axes retenus : chimique, radiologique, être humain, et faune/flore. Il a donc semblé cohérent de poursuivre cette piste dans les premières phases de réflexion. Ainsi, le prototype 2 se compose de quatre cadrans. Les deux cadrans supérieurs sont dédiés à la nocivité radiologique vis-à-vis de l'être humain et de la faune/flore. Les deux cadrans inférieurs sont dédiés à la nocivité chimique vis-à-vis de l'être humain et de la faune/flore. Chaque cadran peut alors se décliner de

manière à présenter les niveaux de nocivité associés aux différents sous-indicateurs ainsi que leur évolution dans le temps. A noter que pour ce prototype, les nocivités radiologique et chimique se répartissent selon une échelle de gradation à 6 niveaux. Une augmentation du niveau de nocivité conduit ainsi à remplir progressivement l'ensemble du diagramme et s'accompagne d'un changement de couleur, propre à chaque niveau.

Nom du colis de déchet

B A-F			Irradiation	A
			Radiotoxicité interne par ingestion	B
			Radiotoxicité interne par inhalation	B
			Ecoradiotoxicité externe	A
			Exoradiotoxicité interne	B
4 1-6			Chimiotoxicité à seuil par ingestion	4
			Chimiotoxicité sans seuil par ingestion	1
			Chimiotoxicité à seuil par inhalation	4
			Chimiotoxicité sans seuil par inhalation	3
			Chimio écotoxicité	4

Figure 15 : Principe général du prototype 1

Nom du colis de déchet

B A-F			B
			B
4 1-6			4
			4

Nom du colis de déchet

B A-F	
4 1-6	

Nom du colis de déchet

		B
		4
		B
		4

Nom du colis de déchet

	A	B	C	D	E	F
	1	2	3	4	5	6

	1	2	3	4	5	6
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Figure 16 : Déclinaisons possibles du prototype 1

[illegible]

PAGE 43 SUR 58

Les échanges du GT Restreint sur ces deux prototypes d'indicateur ont suscité de nombreux questionnements conduisant à la conclusion que les représentations proposées doivent encore être améliorées si cette démarche se poursuit.

6.3 Questionnements associés aux deux prototypes d'indicateurs

L'analyse des deux prototypes d'indicateurs conduit le GT Restreint à identifier plusieurs questions non résolues.

Une entrée par cible de protection ou par type de danger

Le prototype 1 peut se décliner à partir des types de danger (radiologique/chimique) ou des cibles de protection (être humain et/ou faune/flore). De son côté, le prototype 2 affiche simultanément ces deux dimensions *via* un cadran de type Kiviat. Il se trouve que le choix entre ces représentations ne repose pas sur une justification scientifique particulière puisque dans chaque cas, les sous-indicateurs peuvent être déclinés et présentés. Cela dépend davantage de la sensibilité et des attentes du public. Le GT Restreint a donc décidé de laisser ces options ouvertes.

Des codes couleurs et des symboles à faire évoluer

Bien que le GT Restreint se soit accordé pour écarter les couleurs pouvant être perçues comme alarmantes (e.g., rouge, orange), les prototypes développés les ont conservées, l'effort ayant été porté en première intention sur d'autres aspects de représentation. D'autres palettes colorimétriques pourraient néanmoins être testées à l'avenir. Concernant l'iconographie employée, les choix de la fleur comme symbole de la faune/flore ainsi que de la fiole comme symbole de la nocivité chimique ont largement été débattus, jugés peu intuitifs et non suffisamment représentatifs des enjeux à transmettre. Le GT Restreint estime que ces deux aspects (choix des couleurs et de l'iconographie) seraient à retravailler mais cela dépasse le cadre de son mandat.

Le besoin d'organiser et de hiérarchiser l'information

Le nombre important d'informations à faire porter par l'indicateur de nocivité a conduit le GT Restreint à privilégier un indicateur évolutif, présentant des informations agrégées en premier niveau de lecture puis de plus en plus de détails aux niveaux suivants. La définition du nombre de niveaux de lecture et de leur contenu resterait cependant à préciser. L'enjeu serait d'assurer une déclinaison pédagogique adaptée, ce qui ne pourrait relever du seul GT Restreint. D'autant que s'il vient à être développé, le format de l'indicateur (papier ou numérique) conditionnera les possibilités de présentation de l'information.

Prise en compte de l'évolution temporelle

La difficulté de représenter l'évolution temporelle de la nocivité de manière claire est un fait avéré. L'intérêt de distinguer cinq temporalités pour caractériser l'évolution de la nocivité radiologique a été questionné au sein du GT Restreint. Des simplifications pourraient être envisagées, en fonction de ce que le public cherche à comprendre sur les enjeux de nocivité à long terme.

Accompagnement de l'indicateur de nocivité

Pour clarifier son usage, le GT Restreint estime que l'indicateur de nocivité, s'il vient à être amélioré puis déployé, devrait porter un titre explicite. Ce titre devrait refléter la notion de potentiel de nocivité, rappelant ainsi qu'il s'agit d'un indicateur de nocivité intrinsèque, indépendant des modalités de gestion. Une notice d'accompagnement pourrait par ailleurs être élaborée pour expliciter la signification des différents sous-indicateurs et faciliter la compréhension des informations transmises. La conception de cette notice et son contenu devraient néanmoins répondre aux attentes du public intéressé par l'indicateur de nocivité.

Parvenu au terme de ses réflexions, le GT Restreint a souhaité mettre à profit la création du GT Pluraliste pour éclairer ces divers questionnements non résolus. Le GT Pluraliste a donc été sollicité pour partager ses attentes et ressentis à ces sujets. Le livrable du GT Pluraliste [10] détaille les travaux qu'il a conduit et présente la dernière version du prototype d'indicateur de nocivité.

7. Limites de l'approche et perspectives de travail

Les chapitres 3 à 5 du présent rapport détaillent l'approche générale d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs proposée par le GT Restreint. Cette approche a été appliquée aux colis de déchets radioactifs et mise en pratique sur quelques cas concrets. Elle présente toutefois des limites, recensées tout au long de ce document, à commencer par la complexité de l'information véhiculée par l'indicateur, peu accessible au public en première lecture. Avant d'envisager d'engager d'autres développements susceptibles de lever tout ou partie de ces limites, la majorité du GT Restreint estime que ces dernières doivent être évaluées et débattues au-delà de son seul cadre de réflexion, de manière à identifier ce qui mérite ou non d'être poursuivi. Ce n'est qu'une fois cette évaluation réalisée et partagée, et si l'approche d'appréciation de la nocivité est jugée -sur le fond- pertinente, que la poursuite des travaux pourrait être engagée. Pour un membre du GT Restreint cependant, les difficultés méthodologiques sont telles qu'elles remettent en cause l'utilité et la pertinence même de l'indicateur de nocivité et l'action pourrait être clôturée.

Dans ce contexte, ce chapitre présente d'abord les limites actuelles de l'approche, telles qu'identifiées par le GT Restreint, avant d'exposer les éventuelles perspectives qui pourraient être mises en œuvre dans l'hypothèse où l'approche d'appréciation de la nocivité serait validée et sa traduction sous forme d'indicateur confirmée.

7.1 Les limites actuelles de l'approche

7.1.1 Absence de définition réglementaire de la nocivité

Le concept de nocivité ne fait aujourd'hui l'objet d'aucune définition claire dans le cadre législatif et réglementaire. Le chapitre 1 rappelle que seul le Code de l'environnement emploie le terme de nocivité pour exprimer l'exigence de réduction visée par les étapes de retraitement des combustibles usés, et de traitement/conditionnement des déchets radioactifs, sans pour autant en préciser la portée.

Dans son avis du 20 juillet 2016 (cf. section 1.1), l'Ae constate aussi l'absence de concept clair relatif à la nocivité des matières et déchets radioactifs et demande qu'il soit explicitement défini, en intégrant aussi bien les potentiels de dangers radiologiques, que chimiques et écotoxicologiques. L'Ae invite également à tenir compte « des modalités d'exposition de la population, des modes de gestion et de la diffusion des substances dans l'environnement ». Si les notions de potentiels de dangers radiologiques, chimiques et écotoxicologiques semblent directement en lien avec le concept de nocivité tel que compris dans le langage courant (i.e., caractéristique susceptible de nuire à la santé, cf. section 3.2), le fait d'y intégrer les modalités d'exposition des populations, les modes de gestion et la diffusion des substances dans l'environnement amène à une ambiguïté. En effet, les modes de gestion visent précisément à limiter l'exposition des populations et la diffusion des substances dans l'environnement, et donc, in fine, à réduire la nocivité des matières et déchets radioactifs.

Cette ambiguïté a rendu difficiles les réflexions du GT Restreint qui a décidé de définir la nocivité comme une « caractéristique intrinsèque du déchet radioactif ou de la matière radioactive susceptible d'altérer la santé de l'être humain et/ou des écosystèmes » (cf. section 3.2). Il n'en reste pas moins que ce choix amène à plusieurs hypothèses fortes qui ne permettent pas de répondre complètement à la demande initiale de l'Ae, en faisant notamment abstraction des modalités d'exposition de la population et des modes de gestion. **Par conséquent, le GT Restreint demande la clarification de la notion de nocivité. Il s'agit d'un prérequis à tout travail relatif à la caractérisation de cette nocivité, et notamment à toute éventuelle adaptation ou poursuite de l'approche proposée dans ce document, le cas échéant.**

7.1.2 Limites associées au choix de la nocivité intrinsèque des colis de déchets radioactifs

La méthode d'appréciation développée par le GT Restreint vise la nocivité intrinsèque au travers de situations d'expositions standardisées et cible, en première approche, les colis de déchets radioactifs. Elle ne permet donc pas une quantification d'impacts réels, mais cherche à balayer l'ensemble des potentiels de dangers engendrés par un colis de déchets radioactifs. Sa caractéristique est qu'elle conduit à comparer les colis de déchets radioactifs au travers des potentiels de danger en s'exemptant du plus grand nombre de biais possible (cf. section 3.2).

Au regard de la demande initiale à savoir, fournir une information simple et compréhensible au public, cette méthode soulève plusieurs limites relevées à de multiples reprises dans ce document :

- Les situations d'exposition standardisées font appel à un minimum de données d'entrée et échappent, par principe, à tout réalisme. Par conséquent, elles n'intègrent pas les modalités de gestion actuelles des colis de déchets radioactifs. Les niveaux de nocivité ainsi obtenus n'ont qu'une valeur relative (objectif de comparaison) et ne doivent pas être interprétés comme des valeurs absolues reflétant un risque. Or, ces niveaux de nocivité pourraient - même accompagnés d'explications - être difficilement compréhensibles par le public et conduire à des interprétations erronées.
- Toujours pour limiter au maximum les paramètres d'entrée, des hypothèses simplificatrices ont été adoptées : les radionucléides et substances chimiques contenus dans un colis de déchets radioactifs ont été considérés comme intégralement ingérés, dispersés dans l'air (exposition par inhalation) ou dilués dans l'eau (exposition de la faune/flore aquatique) sans tenir compte de leurs caractères plus ou moins dispersables, bioaccumulables, etc. Ceci conduit à maximiser les potentiels de danger obtenus et à les décorrélér de toute réalité. Dans une logique de comparaison des potentiels de danger entre eux, cette maximisation des résultats ne présente pas de difficulté en soi pour un public d'experts. Elle entraîne néanmoins deux conséquences sujettes à discussion. La première tient au risque de mésinterprétation par le public qui, même avec un accompagnement dédié, est susceptible de ne pas clairement distinguer les notions de potentiels de danger et de risques absolus. La seconde est d'ordre technique puisqu'en supposant un comportement homogène des différents radionucléides et substances chimiques, il est fait abstraction de leurs caractéristiques physico-chimiques propres. Cette simplification a été rendue nécessaire par le fait que ces caractéristiques sont fortement dépendantes du milieu et que, les prendre en compte nécessiterait l'ajout de nombreuses hypothèses supplémentaires site-spécifiques, incompatibles avec la logique des situations simplifiées et normalisées retenues.
- Le colis de déchets radioactifs, en tant qu'objet d'évaluation, introduit lui aussi des biais d'interprétation. Les radionucléides et substances chimiques qu'il contient sont en effet considérés comme entièrement mobilisables, sans que les éléments constitutifs du colis (i.e. matrice et enveloppe notamment, cf. section 3.3) ne soient pris en compte pour leur rôle de confinement. Le conditionnement n'est finalement intégré dans les calculs qu'au travers de sa masse. Or, présenter des niveaux de nocivité associés à un colis de déchets radioactifs sans rendre compte de ses performances de confinement revient à ignorer ce qui en fait précisément son rôle et ses fonctions, ouvrant la voie à des mésinterprétations supplémentaires par un public non expert. Cette limite se traduit également par l'incapacité de l'approche à informer simplement le public de la réduction de nocivité apportée par les opérations de traitement et de conditionnement, et donc à illustrer concrètement les orientations de l'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement.
- Dans la continuité de ces constats, l'appréciation de la nocivité « intrinsèque » produit des potentiels de danger qui, par construction, sont déconnectés de toute situation réaliste d'exposition. Un colis de déchets radioactifs composé d'acier inoxydable en est un exemple révélateur puisque d'après les situations d'expositions retenues et les hypothèses de mobilisation totale prises en compte, ses potentiels de danger chimique se voient plus élevés que d'autres colis ne comportant pas d'acier inoxydable. Il s'agit pourtant dans la réalité d'un composé peu réactif et faiblement biodisponible dans les conditions usuelles d'exposition. Ce paradoxe est lié au choix de la méthode qui a été construite pour permettre la comparaison relative des colis de déchets radioactifs entre eux. A partir du moment où les hypothèses s'appliquent uniformément à l'ensemble des colis de déchets radioactifs, tant pour les radionucléides que pour les substances chimiques, l'objectif de comparaison peut être considéré comme satisfait. En revanche, cela en limite clairement le périmètre d'interprétation. Les potentiels de danger calculés ne traduisent pas la nocivité effective des objets dans une situation réelle d'exposition, mais une nocivité théorique, construite par convention. C'est précisément cela qui rend l'indicateur difficilement interprétable et induit de possibles mésinterprétations par le public.

L'ensemble de ces difficultés conduit aujourd'hui à constater que si l'objectif de départ se veut simple (apprécier des potentiels de danger en réduisant au maximum les hypothèses et paramètres de calcul), les choix successifs opérés tout au long de la démarche finissent paradoxalement par complexifier l'interprétation des résultats et donc l'information portée par l'indicateur. La démarche pourrait aboutir in fine à des confusions voire des incompréhensions de la part d'un public non averti sur les niveaux de nocivité obtenus. Si les membres du GT Restreint s'accordent à dire que l'approche aujourd'hui développée ne saurait être appliquée en l'état, certains restent convaincus que la réponse à l'action ENV.2 du PNGMDR -et au-delà à la demande initiale de l'Ae- ne peut se faire que par le prisme de la nocivité intrinsèque. Une clarification du cadre de la demande reste néanmoins essentielle pour confirmer ou infirmer la méthode développée jusqu'à présent. D'autres membres du GT Restreint pensent que cette approche ne permet pas d'apporter une information claire au public.

7.1.3 Objectif partiellement atteint

La section 3.2 précise que la méthode d'appréciation de la nocivité développée par le GT Restreint cherche à fournir au public un indicateur permettant de refléter « les caractéristiques susceptibles d'altérer la santé de l'être humain et/ou des écosystèmes » avec l'ambition de couvrir l'intégralité des potentiels de danger liés à un colis de déchets radioactifs. Force est de constater que cet objectif n'est aujourd'hui que partiellement atteint. Le paragraphe précédent a ainsi démontré que l'information aujourd'hui produite reste difficilement compréhensible pour un lecteur non averti et pourrait conduire à des mésinterprétations. Par ailleurs, les exemples d'application présentés en section 4.4 montrent que pour le cas de la nocivité chimique, le manque de VTR conduit à une appréciation incomplète des potentiels de dangers chimiques. De même, pour le cas de la nocivité vis-à-vis de la faune/flore, seul l'écosystème aquatique est aujourd'hui considéré ; or l'exhaustivité de la démarche supposerait de couvrir l'ensemble des milieux (eau, air, terre), ce qui se heurte également, en l'état des connaissances scientifiques actuelles, à un manque de valeurs de référence. Résoudre ces difficultés ne relève pas du mandat du GT Restreint. Il convient toutefois de reconnaître la démarche pour ce qu'elle apporte d'innovant puisqu'en intégrant la dimension chimique en parallèle de la dimension radiologique, elle ouvre un champ d'appréciation de la nocivité intrinsèque qui, somme toute, reste peu exploré, y compris dans le domaine conventionnel. En ce sens, les limites ici identifiées ne sont pas propres aux déchets radioactifs et reflètent l'absence, plus générale, d'outils pour une appréciation exhaustive de la nocivité chimique. Selon un membre du GT Restreint, lorsqu'un indicateur de nocivité chimique représentatif, susceptible d'informer efficacement le public, sera mis en œuvre pour les substances chimiques en général, il sera possible de l'appliquer aux substances radioactives, qui ne seront alors qu'un cas particulier.

7.1.4 Enjeux de lisibilité de l'indicateur

La méthode d'appréciation de la nocivité développée par le GT Restreint conduit aujourd'hui à la définition de 10 sous-indicateurs de nocivité vis-à-vis de l'être humain et de la faune/flore, tant sur le plan radiologique que chimique. Si cette approche permet de répondre au mieux à l'objectif initial fixé, plusieurs limites sont clairement identifiées. En premier lieu, la multiplication des sous-indicateurs sature l'information et nuit à la lisibilité du message à transmettre. Par ailleurs, les notions portées par chacun des 10 sous-indicateurs (radiotoxicité par ingestion ou inhalation, chimiotoxicité à seuil et sans seuil, etc.) sont difficilement accessibles en première lecture pour un public non averti, et requièrent un effort de compréhension significatif. À l'inverse, ces mêmes sous-indicateurs peuvent paraître trop simplistes pour un public expert en quête d'informations précises. Enfin, et comme mentionné à plusieurs reprises, appréhender la signification des niveaux de nocivité produits est complexe et pourrait conduire à des interprétations erronées.

Ces limites poussent le GT Restreint à interroger plus largement la portée de l'indicateur de nocivité : Quel en serait l'usage ? Quelles en seraient les cibles ? Ces questions, reprises et largement débattues au sein du GT Pluraliste [10], ne sont pour autant toujours pas tranchées, ce qui plaide une nouvelle fois pour un cadrage plus clair de la demande initiale.

7.1.5 Questionnements en lien avec ceux soulevés par le GT Pluraliste

Les réunions du GT Pluraliste qui se sont tenues en 2025 ont été l'occasion pour le GT Restreint de présenter la méthode et d'expliquer les choix structurants qu'il a fait. Dans son livrable [10], le GT Pluraliste formule plusieurs recommandations qui tantôt confortent les pistes de travail déjà identifiées par le GT Restreint (e.g., besoin d'une définition claire de la nocivité, usage de l'indicateur en fonction des cibles visées, etc.), tantôt suscitent de nouvelles réflexions.

Une des critiques majeures avancées par le GT Pluraliste porte sur le choix de caractériser une nocivité intrinsèque, en développant des sous-indicateurs reflétant des potentiels de danger ne correspondant pas à des situations d'exposition plausibles. Comme évoqué au paragraphe 7.1.2, les membres du GT Restreint ont conscience de la complexité de l'indicateur de nocivité proposé, et de son décalage avec la réalité des expositions du public. Certains estiment néanmoins qu'ancrer un indicateur de nocivité au plus près de cette réalité reviendrait à doubler les évaluations réglementaires des sites industriels existants ou en projet, réalisées dans le cadre des études d'impact ou des bilans de surveillance et dont les résultats sont déjà mis à disposition du public. Pour pallier cette difficulté, plusieurs pistes de travail ont été identifiées (cf. 0).

7.1.6 Besoin de cadrage précis avant la poursuite des travaux sur l'indicateur de nocivité

L'ensemble des limites détaillées précédemment conduit une majorité du GT Restreint à conclure que l'éventuelle poursuite des travaux relatifs à un indicateur de nocivité des matières et déchets radioactifs requiert a minima et au préalable un cadrage plus précis et plus clair des objectifs à atteindre, là où un membre du GT Restreint considère que l'action doit être arrêtée dans l'attente d'un indicateur de nocivité chimique pour les substances chimiques dans leur ensemble. Ainsi la compatibilité de ces objectifs avec les limites de l'approche

portée par le GT Restreint doit être challengée pour définir clairement les éventuelles suites à donner à ces travaux. Ce besoin rejoint celui exprimé par le GT Pluraliste. Pour mémoire, la finalité d'un tel indicateur est questionnée depuis le PNGMDR 2016-2018. Or, l'action ENV.2 du PNGMDR 2022-2026 a demandé de poursuivre les réflexions sur la nocivité, sans pour autant justifier l'intérêt d'un indicateur de nocivité ni apporter les précisions en termes d'attendus concrets.

7.2 Perspectives envisagées en cas de poursuite des travaux sur l'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs

Conscient des limites de l'approche qu'il a construite, le GT Restreint s'est attaché à mener à leur terme ses réflexions en envisageant les perspectives qui permettraient de s'affranchir en tout ou partie des difficultés identifiées précédemment. **Toutefois, une majorité du GT Restreint réitère son point de vue quant à l'indispensable redéfinition préalable des attendus et du cadre dans lesquels les travaux décrits devraient s'inscrire.**

7.2.1 Développement de l'approche pour les matières radioactives

Comme évoqué au chapitre 2, la méthode proposée n'a pas fait l'objet d'une application au cas des matières radioactives. Le GT Restreint s'est en effet donné pour priorité la définition de critères d'appréciation de la nocivité applicables aux colis de déchets radioactifs, de manière à tester dans le temps de son mandat la robustesse de l'approche ainsi proposée.

Si toutefois les travaux sur la nocivité des matières et déchets radioactifs devaient se poursuivre, des adaptations seraient nécessaires, à commencer par la définition de l'objet d'étude, qui devra s'articuler avec les choix structurants déjà réalisés, lesquels sont susceptibles d'évoluer en fonction du cadrage global de la demande. En effet, une fois la notion de nocivité clairement définie et l'usage ainsi que les cibles de l'indicateur précisés, l'appréciation de la nocivité des matières radioactives serait à construire spécifiquement, en tenant compte de leurs caractéristiques propres (e.g., conditionnement, niveaux d'activité, potentiels de danger) qui diffèrent sensiblement de celles des déchets radioactifs.

7.2.2 Perspectives en lien avec le GT Pluraliste

Les échanges avec le GT Pluraliste ont conduit à identifier plusieurs pistes de travail. La pertinence d'afficher des échelles de temps allant jusqu'à 100 000 ans a notamment été questionnée. Le GT Pluraliste propose en effet de recentrer plutôt les calculs à l'échelle de la vie humaine (50 ou 70 ans). Bien que pour certains colis de déchets radioactifs contenant des radionucléides à vie longue ces temporalités ne permettent pas d'observer une évolution nette de la nocivité, le GT Restreint confirme l'intérêt qu'il y aurait à reconsidérer les temporalités retenues. Il recommande donc d'y consacrer un axe de travail si toutefois le développement de la méthode proposée se poursuit.

La construction des échelles de gradation de la nocivité a également été discutée. Le GT Pluraliste propose en effet de s'appuyer sur des méthodes statistiques pour tester la robustesse des niveaux de nocivité aujourd'hui définis. Ces méthodes, plus ambitieuses, nécessiterait d'étendre les tests à un nombre de colis sensiblement plus important que ceux évalués à ce stade. Dans l'hypothèse où la poursuite des travaux permettrait de constituer de tels jeux de données, le GT Restreint confirme qu'il y aurait un intérêt à recourir à ces méthodes pour obtenir une distribution statistiquement plus représentative.

Enfin, concernant la difficulté exprimée par le GT Pluraliste relative au choix de la nocivité intrinsèque, le GT Restreint entrevoit différents axes de réflexion, comme celle de mettre en pratique l'indicateur de nocivité sur des objets du quotidien. Les niveaux de nocivité associés à ces objets, notamment pour la composante chimique, pourront parfois atteindre des niveaux élevés de nocivité intrinsèque illustrant ainsi que les sous-indicateurs reflètent des potentiels de danger qui ne s'expriment pas dans la vie courante. Une piste de travail complémentaire serait de considérer les performances de réduction de la nocivité associées aux modalités de gestion des matières et déchets radioactifs, pour cette fois-ci refléter les performances de confinement associés aux éléments constitutifs du colis de déchets, ainsi que celles associées à l'entreposage et au stockage. Cette option soulève toutefois des difficultés. D'une part, les modalités de gestion différant selon les matières et déchets radioactifs, un biais de comparaison serait introduit. D'autre part, la prise en compte dans l'indicateur de nocivité d'une composante associée au mode de gestion ne peut se substituer aux évaluations qui sont réalisées de ces modes de gestion.

7.2.3 Quelles modalités pour le déploiement opérationnel de l'indicateur ?

Si la méthode a pu être testée sur différents colis de déchets radioactifs, avec les limites déjà citées, son déploiement opérationnel à l'ensemble des colis de l'Inventaire national poserait d'autres questions. En effet, les données d'entrée nécessaires à l'appréciation de la nocivité sont détenues par différents acteurs (producteurs de déchets, Andra) et sont collectées sous différents supports servant des objectifs distincts : évaluations d'impact, déclarations à l'Inventaire national, dossiers de connaissance, dossiers de demande d'acceptation et d'approbation des colis pour les centres de stockage, etc. Répondant à des demandes différentes, ces données – prises dans leur ensemble - ne sont pas toujours homogènes. Si, dans le cadre de leur utilisation actuelle, cela ne présente aucune difficulté, cela devient néanmoins contraignant pour la mise en place d'un indicateur de nocivité. Pour éviter tout biais de comparaison, un travail spécifique d'exploitation et d'harmonisation des données existantes serait donc potentiellement nécessaire.

Ainsi, quelle que soit la méthode d'appréciation de la nocivité qui pourrait être développée par la suite, il existe à terme, si le déploiement doit avoir lieu, un enjeu opérationnel et de gouvernance des données d'entrée. En cas de poursuite des travaux, cette réflexion serait à mener avec l'ensemble des parties prenantes concernées.

7.3 Vers une meilleure appréciation des nocivités radiologique et chimique : un enjeu qui dépasse le cadre du GT Restreint

Comme souligné à plusieurs reprises dans le document, la méthode d'appréciation de la nocivité se heurte aujourd'hui à une prise en compte partielle des enjeux chimiques.

D'abord, sur le plan de l'évolution temporelle, il pourrait être pertinent d'étudier l'effet, sur la nocivité chimique, de la décroissance radioactive conduisant à l'apparition de nouveaux radionucléides (dits « radionucléides fils »). Certains d'entre eux peuvent en effet s'avérer être des toxiques chimiques (plomb par exemple). Les premiers tests réalisés ont montré une contribution négligeable de cette chimiotoxicité au regard de celle des substances non radioactives. Il conviendrait néanmoins de vérifier l'absence de contre-exemples ou bien d'intégrer cette contribution lorsque cela est pertinent.

Ensuite, les exemples d'application présentés dans ce rapport révèlent un biais lié à l'absence de VTR pour certaines substances chimiques qui conduit à une appréciation partielle de la nocivité chimique. Ce point dépasse le cadre du GT Restreint, et du PNGMDR plus globalement mais il est néanmoins important de souligner qu'il y aurait un besoin de recherche si l'on voulait compléter les valeurs de référence existantes.

Enfin, et comme évoqué précédemment, les domaines d'évaluation des risques pour les substances chimiques et radioactives dépendent de cadres et d'hypothèses distincts (e.g., extrapolation aux faibles doses, définition de la dose, effets sur la santé pris en compte, etc.), ce qui ne permet pas aujourd'hui, l'agrégation des sous-indicateurs de nocivités radiologique et chimique en un indicateur global. Cet enjeu dépasse à nouveau le cadre du GT Restreint et, au-delà, celui du PNGMDR, mais il pourrait être intéressant que la recherche se poursuive pour une meilleure harmonisation de ces deux types d'évaluation. Il pourrait aussi être intéressant de parvenir à une évaluation conjointe de ces substances, pour proposer *in fine* un indicateur unique.

En attendant, le GT Restreint n'est pas favorable à la création d'un indicateur de nocivité global qui ne distinguerait pas les composantes radiologique et chimique. Toutefois, prenant en compte les retours du GT Pluraliste [10], qui souligne qu'un indicateur global facilite la compréhension en première lecture, le GT Restreint estime qu'un indicateur fondé sur le niveau le plus pénalisant entre nocivité chimique et radiologique pourrait répondre en partie à la demande du GT Pluraliste et du PNGMDR. Il serait nécessaire de bien préciser que cela ne constitue pas une agrégation à proprement parler puisque plutôt que de combiner ou d'additionner les deux composantes, il s'agit de retenir la plus contraignante des deux.

8. Conclusion

L'édition 2016-2018 du PNGMDR a fait l'objet d'un avis de l'Ae qui a notamment recommandé de fournir une information plus accessible au public sur la nocivité radiologique et chimique des matières et déchets radioactifs, vis-à-vis de l'être humain et/ou de la faune/flore. Dans ce cadre, plusieurs travaux ont été engagés par l'IRSN et l'Andra pour décliner opérationnellement cette demande sous forme d'un indicateur de nocivité destiné au public et qui figurerait sur les fiches descriptives de l'Inventaire national. Ces travaux ont été menés sans disposer d'une définition claire du terme même de « nocivité », cette notion étant absente des cadres réglementaires et législatifs actuels.

Dans l'édition suivante du PNGMDR, couvrant la période 2022-2026, l'Andra a été nommée pilote de la poursuite du développement de l'indicateur de nocivité, avec l'appui de différents experts. A ce titre, l'Andra a créé en 2023 le GT Restreint composé de représentants de l'IRSN -devenu depuis ASNR-, du CEA, d'EDF et d'Orano.

Dans un premier temps, le GT Restreint a remis, au printemps 2023, une feuille de route dressant un état des lieux des actions menées depuis 2016 et concluant sur l'inapplicabilité des premières approches développées par l'IRSN et l'Andra.

Dans un second temps, le GT Restreint a entrepris de construire une méthode d'appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs qui visait l'objectif d'être compréhensible pour le public et partagée par les différents acteurs de la gestion des déchets radioactifs. Les efforts de développement du GT Restreint se sont d'abord portés sur le cas des déchets radioactifs.

Le présent rapport détaille la méthode aujourd'hui produite par le GT Restreint, qui explore la manière d'informer le public sur les potentiels de danger des colis de déchets radioactifs représentatifs des familles de l'Inventaire national. Plusieurs choix structurent cette méthode :

- interpréter le terme « nocivité » en exprimant une nocivité « intrinsèque », c'est-à-dire les dangers potentiels (radiologiques et chimiques) pour l'être humain et/ou la faune/flore susceptibles d'être causés par les déchets radioactifs en faisant abstraction de tout réalisme des situations d'exposition, et donc de leurs modalités de gestion réelles ;
- apprécier la nocivité d'un colis de déchets radioactifs dans son ensemble - conditionnement inclus - pour assurer une cohérence avec les modalités usuelles de communication au public, qui portent sur le colis et non sur le déchet brut (cf. fiches familles de l'Inventaire national). Il convient toutefois de préciser que le conditionnement n'intervient dans les calculs qu'au travers de sa masse : son rôle et ses performances de confinement ne sont pas pris en compte.

Sur cette base, dix sous-indicateurs ont été construits pour éclairer les potentiels de nocivité radiologique et chimique vis-à-vis de l'être humain et de la faune/flore :

- cinq sous-indicateurs reflètent les potentiels de nocivité radiologique : trois sous-indicateurs ciblent l'être humain (DeD, radiotoxicité potentielle par ingestion et par inhalation) ; deux autres visent la faune/flore (écoradiotoxicité potentielle externe et interne).
- cinq sous-indicateurs reflètent les potentiels de nocivité chimique : quatre ciblent l'être humain (deux sous-indicateurs pour chaque voie d'exposition, inhalation et ingestion, visant respectivement les substances à seuil et sans seuil) ; un autre sous-indicateur est dédié à la nocivité vis-à-vis de la faune/flore.

Les dix sous-indicateurs ont ensuite été représentés sur deux échelles de gradation distinctes : pour la nocivité radiologique et pour la nocivité chimique. Ces deux échelles sont dotées de métriques différentes (lettrée pour l'une, chiffrée pour l'autre) de manière à souligner visuellement leur indépendance. Elles ont néanmoins été construites en veillant à assurer un minimum de cohérence entre elles : un niveau A sur l'échelle radiologique correspond ainsi à la même gamme de nocivité qu'un niveau 1 sur l'échelle chimique.

L'indicateur de nocivité proposé par le GT Restreint ne produit donc pas une évaluation absolue de la « nocivité » des déchets radioactifs dans le cadre de leur gestion réelle, mais fournit des valeurs de nocivité relatives autorisant la comparaison des colis de déchets radioactifs entre eux.

En s'affranchissant au maximum de l'influence de facteurs extérieurs (propriétés de biodisponibilité, modes de gestion, etc.), cette méthode cible la nocivité intrinsèque de la manière la plus objective possible. Les premiers tests produisent des résultats globalement cohérents avec les nocivités associées aux différentes catégories de déchets radioactifs, et fournissent par ailleurs une information sur la nocivité chimique, ce qui constitue l'un

des apports potentiels de la démarche. Elle traduit notamment la volonté du GT Restreint de chercher à traiter au même niveau l'appréciation des nocivités chimique et radiologique, de la construction des sous-indicateurs jusqu'aux échelles de gradation. Cela tient en grande partie aux efforts fournis par le GT Restreint de mener une expertise croisée qui tienne compte des conseils de l'Ineris.

Aujourd'hui, la méthode d'appréciation de la nocivité explorée par le GT Restreint cherche autant que possible à répondre à l'objectif d'informer le public sur les dangers potentiels associés aux colis de déchets radioactifs. Elle présente néanmoins des limites : la multiplicité des sous-indicateurs, le recours à des situations d'exposition éloignées des conditions réelles de gestion, l'appréciation encore partielle de la nocivité chimique sont **autant de difficultés qui entravent le déploiement potentiel de l'indicateur de nocivité et qui conduisent le GT Restreint à ne pas envisager son utilisation en l'état.**

Au-delà de ces limites méthodologiques, les échanges engagés avec le GT Pluraliste, créé à l'initiative de l'Andra en 2025 et composé de représentants de la société civile et d'experts aux profils variés, mettent en avant que la raison d'être de l'indicateur de nocivité est à questionner : son objectif, ses usages et ses cibles restent insuffisamment définis. Aujourd'hui, le GT Restreint fait le constat qu'il est allé au bout des développements méthodologiques envisageables pour construire un indicateur de nocivité répondant à l'interprétation que le groupe a dû faire des attentes portées par l'Ae et le PNGMDR 2022-2026. La méthode explorée, comme les approches précédemment initiées, ne répond encore une fois pas complètement aux objectifs initiaux. Elle présente des limites, notamment au regard de la compréhension par le public de l'indicateur. Toutefois, il n'est pas techniquement possible en l'état des connaissances et de l'expression des besoins d'envisager une solution autre qui apporterait une information différente de celles déjà fournies par d'autres supports (études d'impact et autres). A l'instar du GT Pluraliste, la grande majorité du GT Restreint considère qu'il est donc indispensable de disposer d'un cadrage clair et partagé avant d'engager éventuellement de nouveaux travaux sur l'indicateur de nocivité, sans toutefois garantir d'atteinte de l'objectif fixé. C'est à cette seule condition que les efforts déjà investis par le GT Restreint pourront trouver leur pleine portée. Un membre du GT va toutefois jusqu'à penser qu'à la suite de ces différentes tentatives, les travaux ne permettent pas de fournir une information claire et accessible pour le public. Il plaide en conséquence pour une suspension des travaux. Selon lui, leur reprise ne se justifierait que si un indicateur de nocivité chimique représentatif serait mis en œuvre pour les substances chimiques en général. Il serait alors possible, à ses yeux, de l'appliquer aux substances radioactives qui ne constitueraient qu'un cas particulier.

9. Références

- [1]. Autorité de Sûreté Nucléaire & Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. (2016) Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2016-2018
- [2]. Autorité Environnementale. (2016) Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (2016-2018), n°2016-036
- [3]. Arrêté du 23 février 2017 pris en application du décret n° 2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs
- [4]. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. (2018) Méthodologie et critères envisageables pour apprécier la nocivité des matières et déchets radioactifs, Rapport n° PSE-ENV/2018-0048
- [5]. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. (2021) Méthodologie et critères envisageables pour apprécier la nocivité des matières et déchets radioactifs – Complément sur le volet « accidentel chimique », Rapport n° 2021-00827
- [6]. Vaillant L, Maitre M, Lafranque E, Schneider T, Wasselin V. (2023). Proposal of a quantitative approach integrating radioactive and chemical risks. Radioprotection 58(2) : 147–155
- [7]. Ministère de la Transition Ecologique. (2022) Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2022-2026
- [8]. Autorité Environnementale. (2021) Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2021-2025, n°2021-96
- [9]. Andra (2023) Méthodologie d'appréciation de la nocivité des matières et des déchets radioactifs. Présentation des orientations méthodologiques envisagées.
- [10]. GT Pluraliste Nocivité. (2026) Appréciation de la nocivité des matières et déchets radioactifs - Travaux sur la définition d'un indicateur de nocivité.
- [11]. Institut national de l'environnement industriel et des risques (2021) Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires – Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées – Deuxième édition
- [12]. Autorité de Sûreté Nucléaire et Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (2021) Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages - Concepts, éléments de base et mise en œuvre au sein de l'étude d'impact
- [13]. Institut national de l'environnement industriel et des risques (2022) Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes - Impact local des activités humaines sur les milieux naturels et la biodiversité - Ineris-181045-831166-v1.0
- [14]. Commission Internationale de Protection Radiologique (2007) Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique

10. Annexe - Résultats complémentaires associés au choix du colis de déchets radioactifs comme objet d'étude

La section 3.3 du chapitre 3 rappelle les éléments constitutifs d'un colis de déchets radioactifs et fait la distinction entre :

- les déchets radioactifs en eux-mêmes ;
- l'éventuelle matrice qui correspond au matériau avec lequel les déchets radioactifs sont mélangés pour limiter leur dispersion (e.g., bitume, verre, liant hydraulique) ;
- l'éventuel matériau de remplissage qui assure le blocage mécanique des déchets radioactifs ou bien complète le remplissage du colis, en vue notamment de réduire les vides ;
- le conteneur ou enveloppe qui constitue l'emballage du colis, permet sa manutention et peut participer à ses performances (barrière de confinement supplémentaire, rôle de protection vis-à-vis des rayonnements ionisants, etc.).

Il est par ailleurs précisé qu'étant donné la diversité des déchets radioactifs produits, une grande diversité de colis de déchets radioactifs existe aujourd'hui et se répartit en :

- colis de déchets radioactifs dits « *homogènes* », au sein desquels les déchets radioactifs sont mélangés à une matrice (e.g., colis bitumés), sans pour autant que la répartition des radionucléides et substances chimiques y soit toujours uniforme ;
- colis de déchets radioactifs dits « *hétérogènes* » au sein desquels les déchets radioactifs sont physiquement distincts des éventuels matériaux de remplissage.

Sur cette base, pour permettre une comparaison cohérente de la nocivité des déchets radioactifs entre eux, le GT Restreint s'est questionné sur la pertinence d'évaluer la nocivité du (i) « *déchet radioactif pur* », du (ii) « *bloc déchet* » (déchets radioactifs, matrice, matériau de remplissage), ou du (iii) « *colis dans son ensemble* - » (les déchets radioactifs, la matrice ou le matériau de remplissage et le conteneur ou enveloppe).

Ces différentes configurations ont été testées sur différents colis de déchets radioactifs sélectionnés pour représenter leur diversité. Plus précisément, quatre colis ont été retenus :

- trois colis dits « *homogènes* » au sein desquels les déchets radioactifs sont intimement liés à une matrice (i.e., verre, bitume, béton) : « *colis HA* », « *colis MA-VL 2* » et « *colis MA-VL 3* » ;
- un colis dit « *hétérogène* » (« *colis MA-VL 1* ») comprenant uniquement des déchets radioactifs compactés.

Les colis de déchets radioactifs choisis ici (à l'exception du colis MA-VL 3) sont les mêmes que ceux sélectionnés pour tester la méthode globale d'appréciation de la nocivité (cf. résultats présentés en section 4.4). Il convient toutefois de préciser que la catégorie de déchets radioactifs n'est pas le critère déterminant pour le test réalisé ici. En effet, l'enjeu est avant tout d'évaluer l'influence des éléments constitutifs des colis de déchets radioactifs sur les résultats. Le fait de ne pas avoir inclus de colis issus d'autres catégories de déchets (telles que FA-VL, FMA-VC et TFA) pour ce test s'explique par cet objectif.

Pour chacun de ces colis, les sous-indicateurs de nocivité vis-à-vis de l'être humain définis au chapitre 4 de ce document ont été calculés en rapportant l'activité de chaque radionucléide et la quantité de chaque substance chimique contenus dans les déchets radioactifs à trois unités de référence distinctes : (i) 1 g de « *déchet radioactif pur* », (ii) 1 g de « *bloc déchet* » et (iii) 1 g de colis « *dans son ensemble* ».

Les Figure 19 et Figure 20 présentent les résultats obtenus pour la radiotoxicité interne par ingestion et par inhalation. Ces résultats ont été normalisés à la valeur de radiotoxicité interne la plus élevée observée parmi les 3 configurations, pour chacun des cas d'exposition (ingestion et inhalation).

Les Figure 21 et Figure 22 présentent les résultats obtenus pour la chimiotoxicité à seuil par ingestion et par inhalation. Ces résultats ont également été normalisés à la valeur de chimiotoxicité à seuil la plus élevée et observée parmi les 3 configurations, pour l'ingestion d'une part, et l'inhalation d'autre part. Il convient de préciser que la chimiotoxicité ici appréciée cible uniquement les substances chimiques contenues dans les déchets radioactifs. La contribution des substances chimiques apportées par les éléments constitutifs du conditionnement est analysée en deuxième partie de cette annexe.

Il convient également de noter que pour le « colis MA-VL 1 », qui ne comprend ni matrice ni matériau de remplissage, la configuration correspondant à 1 g de « *bloc déchet* » n'a pas de sens et n'a donc pas été étudiée.

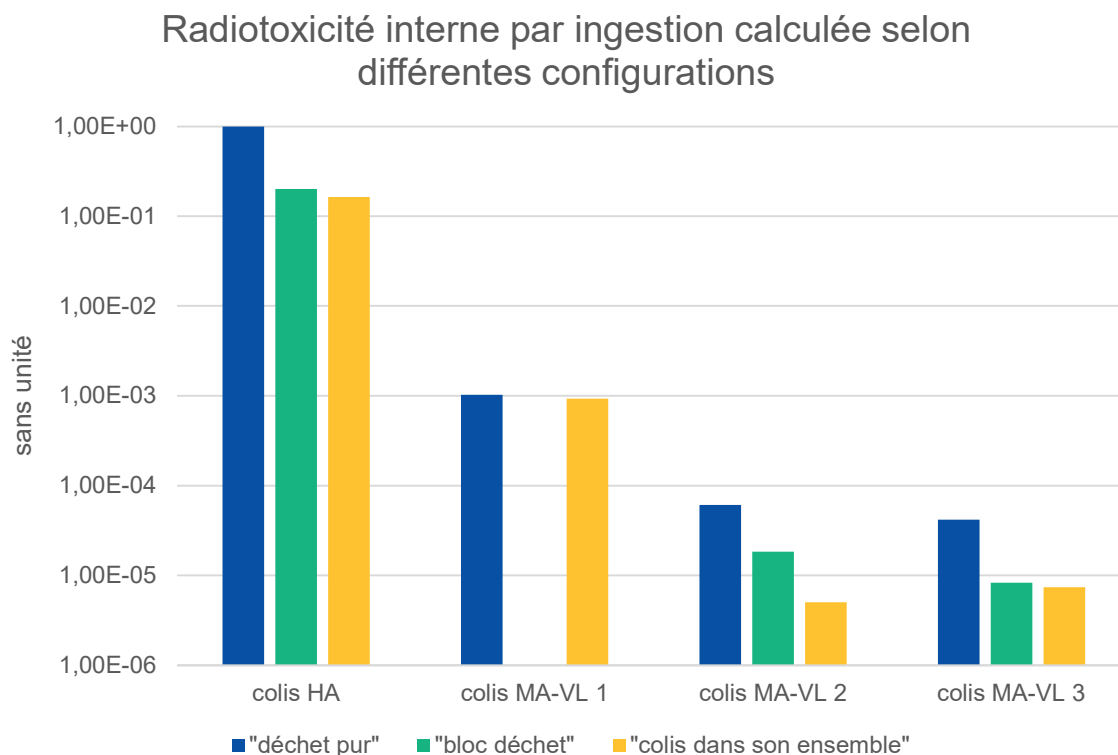


Figure 19 : Radiotoxicité interne par ingestion calculée selon différentes configurations ("déchet pur", "bloc déchet", "colis dans son ensemble")

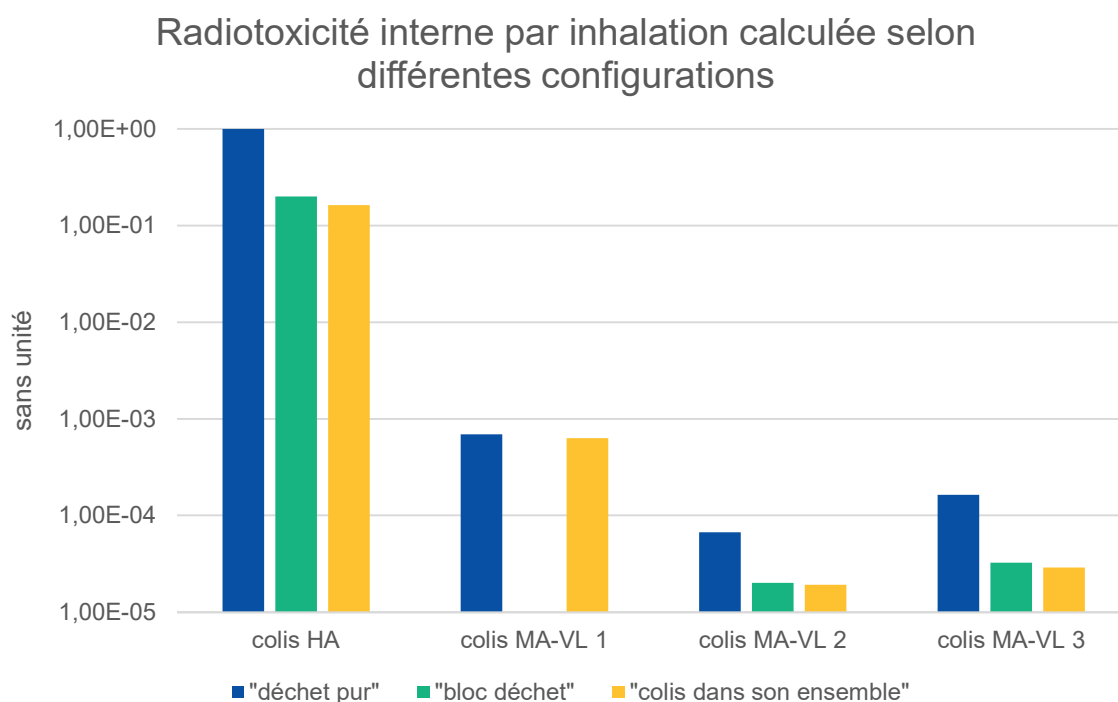


Figure 20 : Radiotoxicité interne par inhalation calculée selon différentes configurations ("déchet pur", "bloc déchet", "colis dans son ensemble")

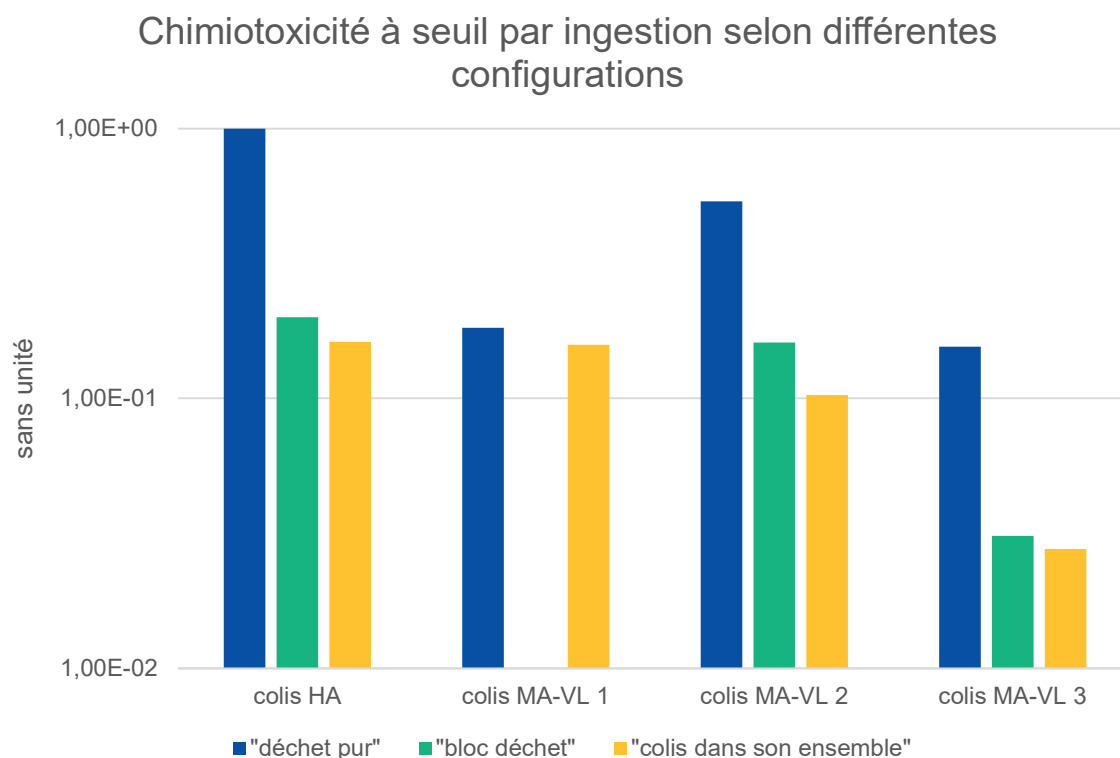


Figure 21 : Chimiotoxicité à seuil par ingestion calculée selon différentes configurations ("déchet pur", "bloc déchet", "colis dans son ensemble")

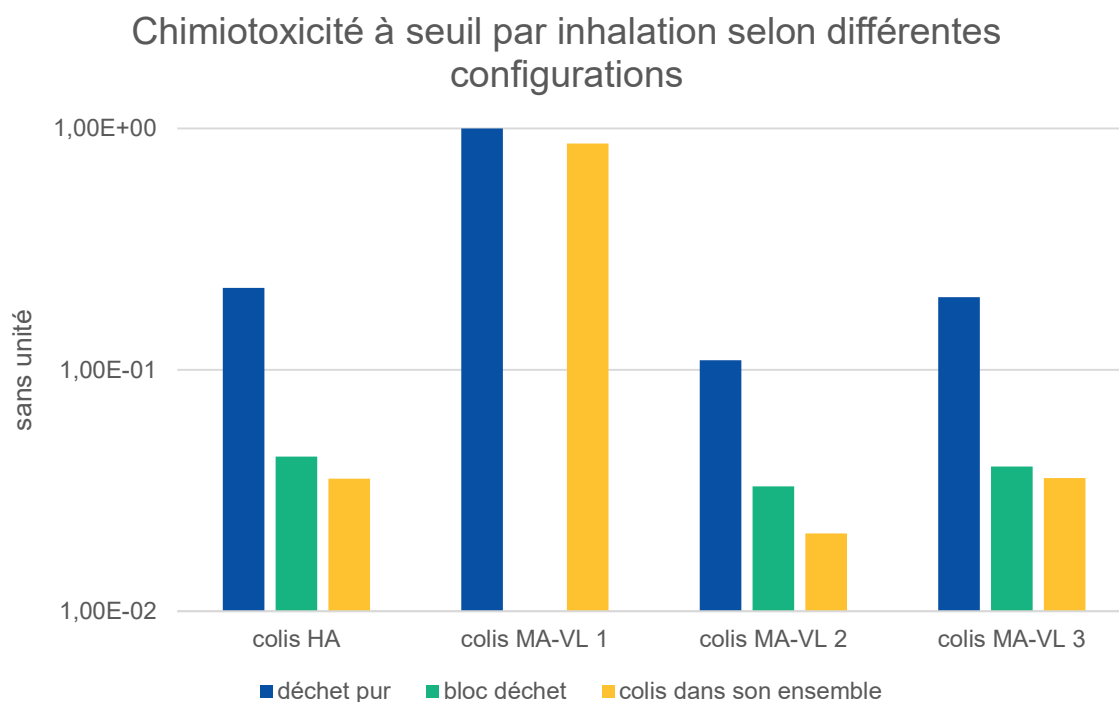


Figure 22 : Chimiotoxicité à seuil par inhalation calculée selon différentes configurations ("déchet pur", "bloc déchet", "colis dans son ensemble")

Les résultats montrent que, pour l'ensemble des colis sélectionnés, quelle que soit la configuration choisie, la hiérarchisation des colis entre eux reste inchangée. La configuration au gramme de « *déchet pur* » conduit aux niveaux de nocivité les plus élevés, tandis que la normalisation au gramme de « *colis dans son ensemble* » produit les niveaux les plus faibles. Ceci s'explique par le fait que l'activité massique en radionucléides et la concentration en substances chimiques dans 1 g de « *colis dans son ensemble* » est plus faible que dans 1 g de « *déchet pur* ». La masse du « *colis dans son ensemble* » intègre en effet celle du conditionnement, ce qui réduit mécaniquement la part de déchet rapportée à la masse totale. Toutefois, ces niveaux de nocivité n'ayant pas de valeur absolue et devant être interprétés de façon relative, les écarts observés entre les différentes configurations sont sans incidence sur les résultats de comparaison des colis entre eux. Ce constat est aussi valable pour les niveaux de chimiotoxicité.

Sur cette base, et tenant compte des considérations listées en section 3.3.2 du document, le GT Restreint a retenu le « *colis dans son ensemble* » comme objet d'étude. L'ensemble des activités radiologiques et des quantités chimiques présentes dans les déchets radioactifs sont donc rapportées au gramme de « *colis dans son ensemble* ».

Cas des substances chimiques apportées par le conditionnement

Si les radionucléides artificiels proviennent exclusivement des déchets radioactifs, des substances chimiques peuvent être présentes dans les déchets radioactifs mais également au sein des autres éléments constitutifs du colis (matrice, matériau de remplissage, enveloppe). La question se pose donc de savoir si l'appréciation de la nocivité chimique doit se concentrer uniquement sur les substances chimiques contenues dans les déchets radioactifs, ou bien doit considérer également celles apportées par le conditionnement. Cette dernière hypothèse pose certaines difficultés en termes de disponibilité de données. En effet, les inventaires chimiques des enveloppes, matrices ou matériaux de remplissage ne sont pas toujours précisés pour des raisons de secrets industriel et commercial. Cela rend difficile de systématiser une appréciation exhaustive de la nocivité chimique à l'ensemble d'un colis. Néanmoins, le GT Restreint a tenté l'analyse et a cherché à apprécier la chimiotoxicité interne en tenant compte des substances chimiques déclarées dans les éléments constitutifs des colis. Les colis HA, MA-VL 1, MA-VL 2 et MA-VL 3, présentés précédemment, ont de nouveau servi de support au test.

Les Figure 23 et Figure 24 présentent les résultats obtenus pour la chimiotoxicité à seuil par ingestion et inhalation. A noter que ces résultats ont de nouveau été normalisés à la valeur de chimiotoxicité interne par ingestion ou inhalation la plus élevée et observée pour l'ensemble des configurations.

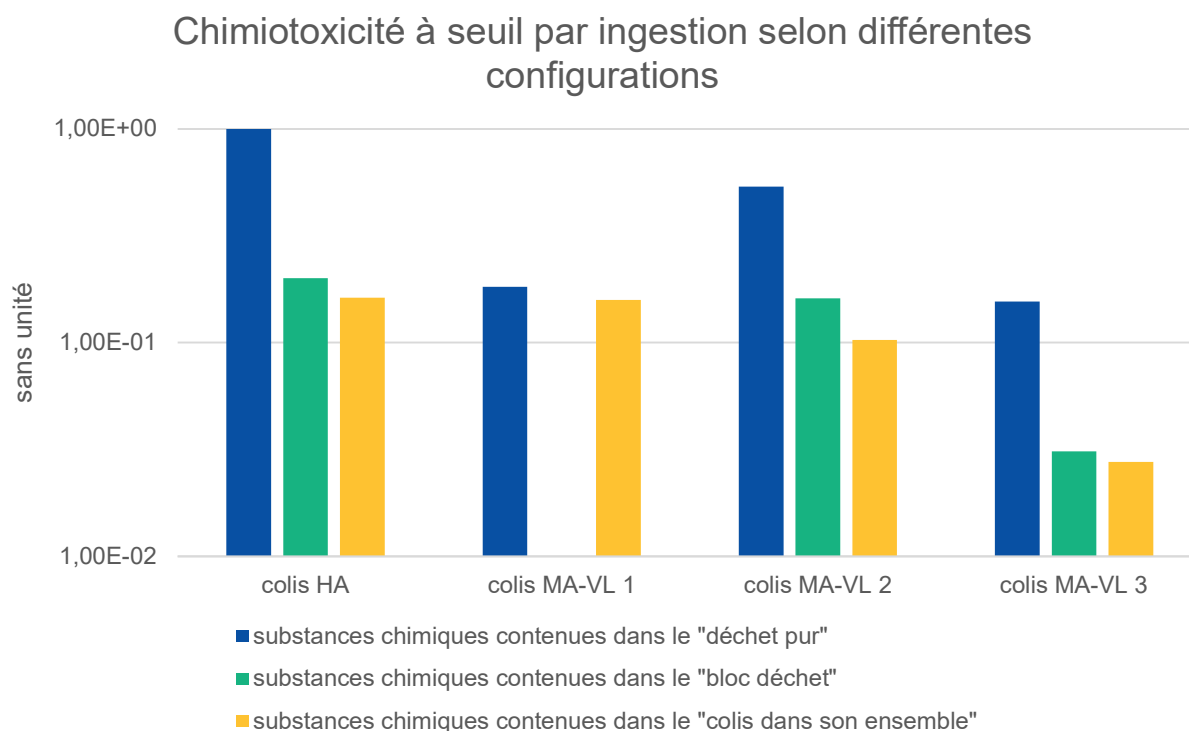


Figure 23 : Chimiotoxicité à seuil par ingestion en intégrant ou non les substances chimiques apportées par les éléments de conditionnement

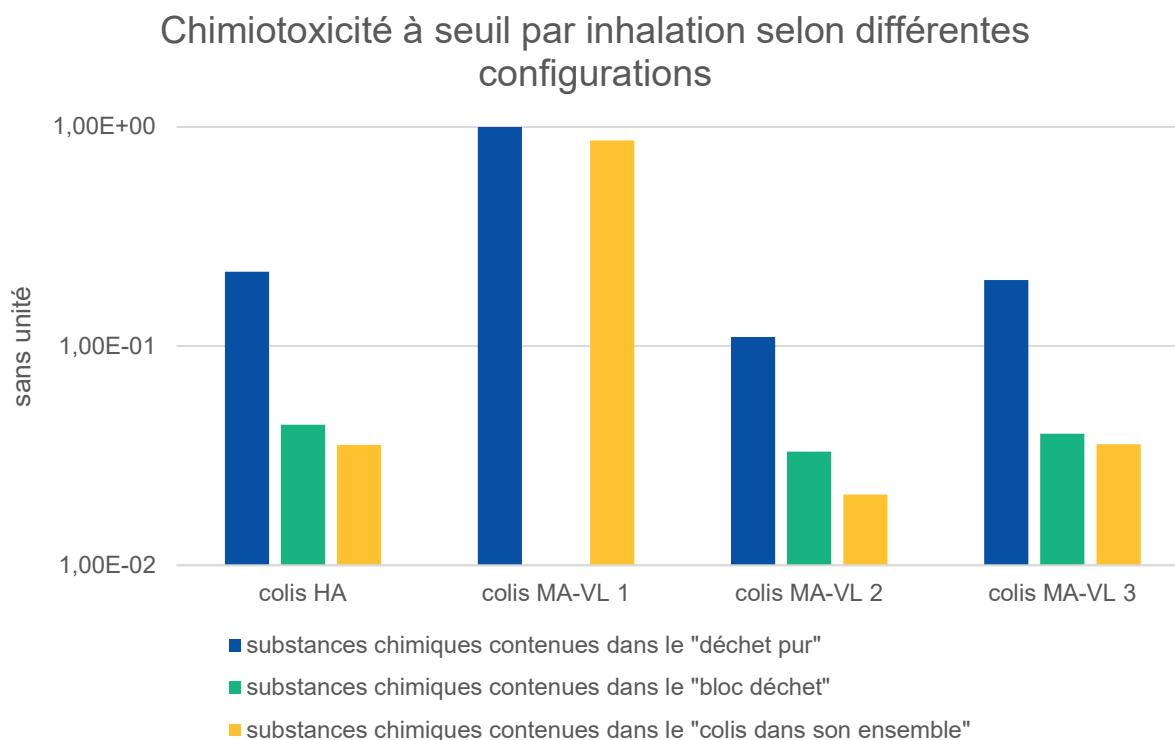


Figure 24 : Chimiotoxicité à seuil par inhalation en intégrant ou non les substances chimiques apportées par les éléments de conditionnement

Les résultats pour la chimiotoxicité à seuil par ingestion montrent que l'intégration des substances chimiques contenues dans les éléments constitutifs du conditionnement conduit, pour les colis HA, MA-VL 1 et MA-VL 2, à des niveaux de nocivité légèrement supérieurs à ceux obtenus en ne considérant que les substances chimiques contenues dans les déchets radioactifs. Aucun écart significatif n'est observé pour le colis MA-VL 3, ce qui s'explique par le peu de substances chimiques présentes dans l'enveloppe de conditionnement. La hiérarchisation des colis varie donc légèrement selon l'hypothèse considérée, puisqu'en tenant compte de l'ensemble des substances chimiques contenues dans un colis de déchets radioactifs, le colis MA-VL 1 présente le niveau de chimiotoxicité à seuil par ingestion le plus élevé, devant le colis HA. Alors que ne considérer que les substances chimiques contenues dans les déchets radioactifs, inverse les positions des colis HA et MA-VL 1, le colis HA présentant alors le plus haut niveau de chimiotoxicité à seuil par ingestion.

Pour la chimiotoxicité à seuil par inhalation, l'intégration des substances chimiques contenues dans le conditionnement conduit également, pour les colis HA, MA-VL 1 et MA-VL 2, à des valeurs plus élevées, avec une différence plus marquée que dans le cas de l'ingestion. Cela s'explique par la prise en compte du chrome et du nickel issus de l'acier inoxydable des enveloppes, car les seuils de toxicité les plus élevés ont été retenus. Aucun écart significatif n'est observé pour le cas du colis MA-VL 3 quelle que soit la configuration (« *déchet pur* » - « *colis dans son ensemble* »).

La hiérarchisation des colis diffère cette fois de façon plus marquée selon la configuration retenue. Si l'on ne prend en compte que les substances chimiques contenues dans les déchets radioactifs, le colis MA-VL 3 se place en deuxième position, derrière le colis MA-VL 1 et devant le colis MA-VL 2. En intégrant l'ensemble des substances chimiques, le colis MA-VL 3 passe en dernière position, derrière le colis HA.

Ces résultats ont fait l'objet de larges discussions au sein du GT Restreint. Dans la plupart des cas, les niveaux relatifs de nocivité des colis de déchets radioactifs restent inchangés d'une configuration à l'autre. L'intégration des substances chimiques issues du conditionnement permettrait d'appréhender la chimiotoxicité du colis de manière plus globale sans en modifier significativement les niveaux. Néanmoins, plusieurs limites ont été identifiées :

- d'une part, l'absence de certaines valeurs toxicologiques de référence ne permet pas une évaluation exhaustive des substances chimiques ;
- d'autre part, l'indisponibilité des données de composition chimique du fait de secrets industriel et commercial introduit un biais de comparaison entre les colis qui disposeraient de caractérisation chimique plus exhaustive tandis que d'autres n'en disposeraient pas.

Le GT Restreint a donc décidé de limiter l'appréciation de la nocivité chimique aux seules substances contenues dans les déchets radioactifs.