

La gestion responsable et durable des déchets radioactifs en France

Par Pierre-Marie ABADIE

Directeur général de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra)

L'énergie nucléaire est le premier secteur producteur de déchets radioactifs en France (devant la recherche, la défense, l'industrie non électronucléaire et le médical). Ces déchets peuvent présenter des risques pour l'homme et l'environnement et nécessitent une gestion adaptée à leur niveau de radioactivité et leur durée de vie. La gestion à long terme de ces déchets a été confiée à l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

La grande majorité sont stockés dans des centres de surface. Il s'agit des déchets de très faible activité ou à vie courte qui représentent plus de 90 % des volumes mais une très faible part de la radioactivité totale. Au contraire, les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, qui sont issus du retraitement des combustibles usés et du fonctionnement des centrales nucléaires, représentent de très faibles volumes mais concentrent 99 % de la radioactivité totale et ne peuvent pas être gérés dans des centres de surface. Ils sont destinés à être stockés dans Cigéo, le projet de centre de stockage géologique profond pour lequel l'Andra a demandé une autorisation de création début 2023.

La politique française en matière de gestion des déchets radioactifs est solide et très bien évaluée à l'international. Elle s'appuie sur une planification forte, avec le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR), des institutions (l'Andra, la CNE2 pour l'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs, l'ASN...) et un financement assuré par les producteurs de déchets radioactifs, selon le principe pollueur-payeur.

La gestion des déchets radioactifs a été confiée à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioac-

tifs (Andra). Établissement public créé en 1991, l'Andra est indépendante des producteurs et placée sous la tutelle des ministres chargés de l'Énergie, de la Recherche et de l'Environnement.

L'Andra remplit une mission d'intérêt général, confiée par l'État, de prise en charge des déchets radioactifs produits par les générations passées et présentes pour les mettre en sécurité pour les générations futures. L'Andra s'appuie sur trois métiers : la recherche et le développement, la conception de projets de stockage et l'exploitation de sites industriels.



Figure 1 : Répartition par secteur économique du volume de déchets (en équivalent conditionné) déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2021.

La gestion des déchets radioactifs

Les déchets radioactifs

Les déchets radioactifs sont des substances radioactives ne pouvant être réutilisées ou retraitées et qui doivent être gérées de manière spécifique¹. Ils sont de natures très diverses et peuvent provenir de la maintenance et du fonctionnement des installations nucléaires, de leur démantèlement, du retraitement du combustible usé des centrales nucléaires, de l'assainissement d'anciens sites pollués par la radioactivité, d'activités de recherche, de processus industriels ou d'examen et de soins médicaux.

Considérant les risques qu'ils représentent, la France a, comme de nombreux pays, fait le choix de les stocker dans des installations industrielles adaptées. L'objectif est de les isoler le temps que leur radioactivité ait suffisamment diminué pour qu'ils ne présentent plus de risques radiologiques.

En France, plus de la moitié des déchets radioactifs, en volume, provient de l'industrie électronucléaire. Toutefois, la recherche, la médecine, la Défense nationale ou encore l'industrie classique utilisent également régulièrement des substances radioactives et produisent des déchets radioactifs.

Aujourd'hui, 90 % du volume des déchets radioactifs produits en France est déjà pris en charge, ou destiné à l'être, dans des centres de stockage de surface gérés par l'Andra. Pour les autres déchets, des projets et études sont en cours (études sur les modes de gestion des déchets FA-VL, projet Cigéo).

Les différentes catégories de déchets radioactifs et leurs modes de gestion

En France, la classification des déchets radioactifs repose principalement sur deux paramètres : le niveau de radioactivité et la période radioactive des radionucléides présents dans les déchets.

Compte tenu de leurs caractéristiques propres, la prise en charge des déchets nécessite la mise en œuvre de moyens de gestion appropriés à leur dangerosité, à leur volume et à leur durée de vie.

Les centres stockages existants

La sûreté du stockage de surface repose sur trois éléments : les colis qui contiennent les déchets, les ouvrages de stockage dans lesquels sont placés les colis et la géologie du site qui constitue une barrière naturelle à long terme.

Les déchets de très faible activité (TFA), essentiellement issus du fonctionnement et du démantèlement des installations nucléaires mais aussi d'industries non-nucléaires utilisant les propriétés de la radioactivité (chimie, métallurgie, etc.), sont pris en charge depuis 2003 au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) situé dans l'Aube.

Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC), issus de la maintenance (vêtements, outils, filtres, etc.) et du fonctionnement d'installations nucléaires et des activités de recherche ou de soins (laboratoires et hôpitaux) étaient, de 1969 à 1994, pris en charge par le Centre de stockage de la Manche (CSM). Depuis 1992, ils sont stockés dans le Centre de stockage de l'Aube (CSA).

Période radioactive* / Activité**	Période radioactive*		
	Vie très courte (VTC) (période < 100 jours)	Principalement vie courte (VC) (période ≤ 31 ans)	Principalement vie longue (VL) (période > 31 ans)
Très faible activité (TFA) < 100 Bq/g		 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	
Faible activité (FA) entre quelques centaines de Bq/g et un million de Bq/g	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
Moyenne activité (MA) de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g			 Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)
Haute activité (HA) de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g	Non applicable	 Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)	

¹ L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement définit notamment les notions de substance, matière et déchet radioactifs, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032043680

Figure 2 : Catégories de déchets radioactifs et filières de gestion associées.

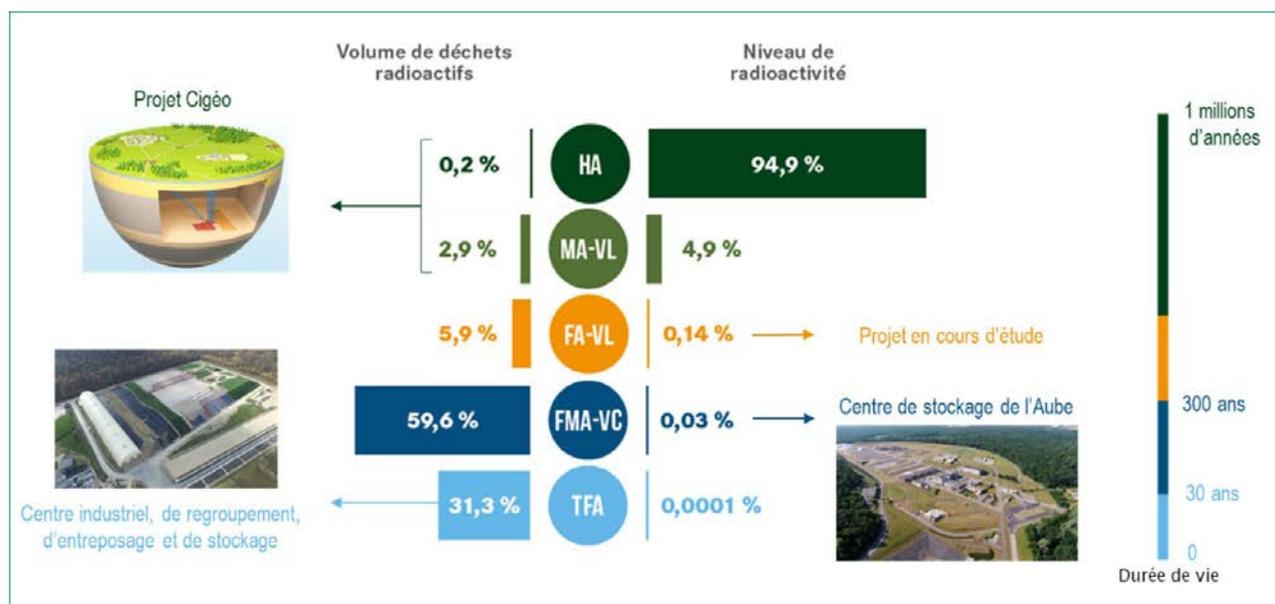


Figure 3 : Présentation du projet Cigéo.

Les centres de stockage en projet

Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) sont essentiellement des déchets radifères qui proviennent d'activités industrielles non nucléaires et des déchets graphites issus des centrales nucléaires de première génération. Ces déchets présentent des durées de vie longues mais leur niveau d'activité est faible : des solutions de gestion adaptées et proportionnées aux enjeux de sûreté sont en cours d'étude.

Pour les déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL), issus principalement de l'industrie électronucléaire, des activités de retraitement du combustible usé et de la recherche, l'Andra conçoit le projet Cigéo, le Centre de stockage géologique profond (cf. ci-après).

Cigéo, le projet de centre de stockage en couche géologique profonde

Aujourd'hui en phase d'instruction par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), après que l'Andra a déposé une demande d'autorisation début 2023, le projet Cigéo a fait l'objet de plus de 30 ans de recherches et d'études de conception.

Histoire du projet

La loi de 1991 a fixé trois voies de recherche pour assurer la gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL : le stockage géologique (Andra), l'entreposage (CEA) et la séparation / transmutation (CEA). Après 15 ans de recherches, les résultats ont été présentés lors du débat public de 2005 et ont fait l'objet d'un avis²

² Avis de l'ASN du 1^{er} février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.

par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en 2006 qui a conclu que :

- la faisabilité technologique de la séparation / transmutation n'était pas acquise ;
- l'entreposage de longue durée ne pouvait constituer une solution de gestion définitive pour la gestion des déchets HA et MA-VL ;
- le stockage en formation géologique profonde est une solution de gestion définitive qui apparaît incontournable.

C'est donc sur cette base qu'en 2006 le Parlement fait le choix du stockage géologique profond pour gérer sur le long terme les déchets HA et MA-VL. Il a confié à l'Andra la conception d'un centre de stockage en Meuse – Haute-Marne. Ce choix, au-delà d'être technique, est également éthique et politique. En effet, il s'agit de s'appuyer sur la stabilité de la géologie pour assurer la protection à long terme de l'homme et de l'environnement, et de ne pas reporter la charge de gestion des déchets sur les générations à venir.

Après en avoir démontré la faisabilité en 2005, l'Andra a engagé la conception de Cigéo et a présenté l'esquisse du projet lors du débat public de 2013. En 2016, l'Andra a remis à l'ASN le dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo, réalisé pour stabiliser les principes, les méthodes et les grands choix de conception pour la sûreté de l'installation. En 2018, l'ASN a estimé, que « le projet a atteint globalement une maturité technologique satisfaisante au stade du DOS³ ». En 2022, Cigéo a été déclaré d'utilité publique, sur la base d'un dossier remis par l'Andra en 2020, et suite à son instruction, à la consultation des collectivités et à une enquête publique. En janvier 2023, l'Andra a déposé la demande d'autorisation de création, qui fait l'objet

³ Avis n°2018-AV-0300 de l'ASN du 11 janvier 2018 dossier d'options de sûreté projet Cigéo.

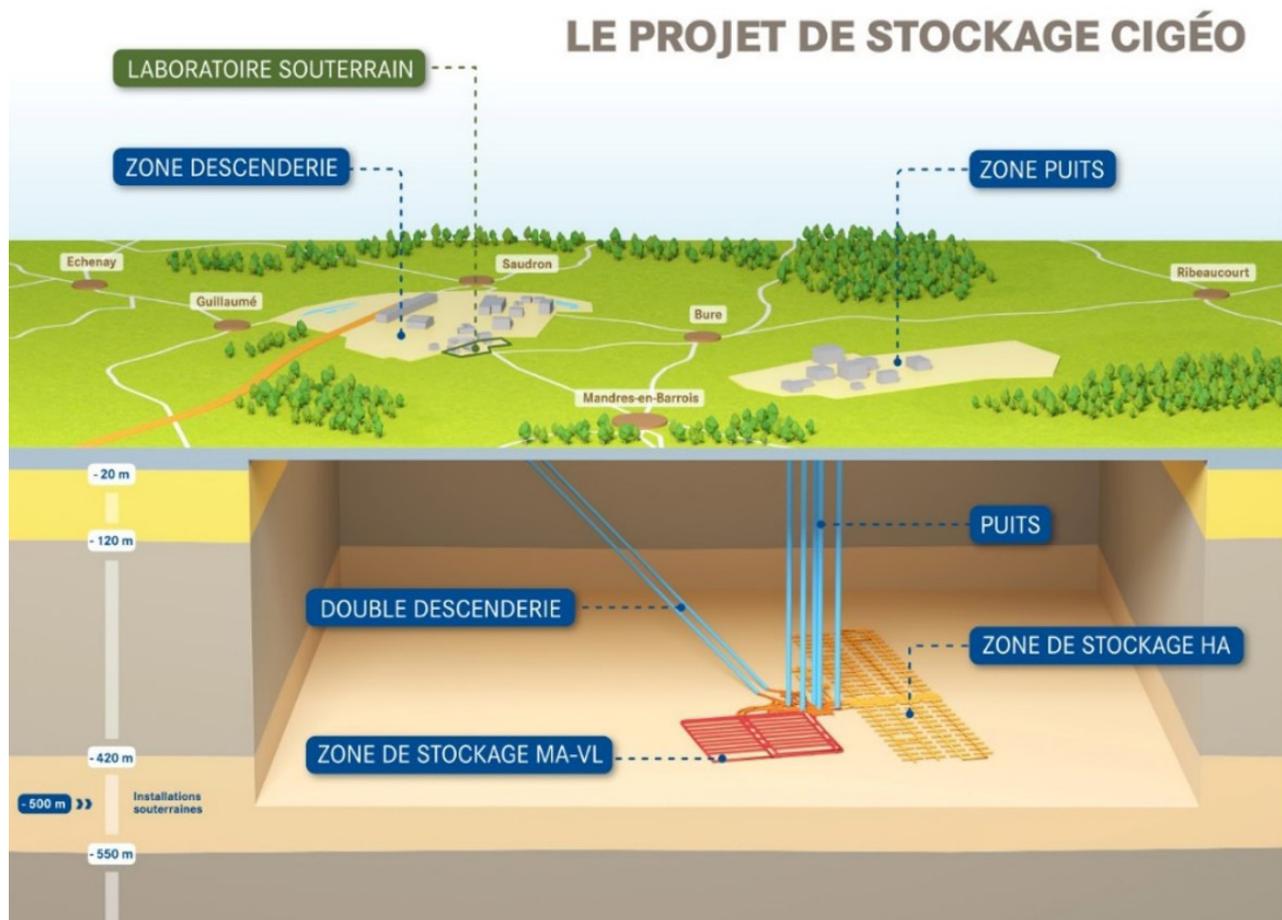


Figure 4 : Le projet Cigéo est composé de deux zones de surfaces éloignées de quelques kilomètres, et d'une installation souterraine comprenant différentes zones de stockage adaptées aux types de déchets à stocker.

d'une instruction de plusieurs années pilotée par l'Autorité de sûreté nucléaire.

Le principe du stockage géologique

Le stockage géologique consiste à placer les colis de déchets radioactifs dans des ouvrages construits en profondeur, dans le sous-sol, et à tirer parti des propriétés naturelles de la roche pour contenir les éléments radioactifs, et très fortement ralentir leur déplacement. Les quelques éléments radioactifs les plus mobiles seront ainsi retenus dans la roche pendant plusieurs centaines de milliers d'années, et ne présenteront plus aucun danger pour l'homme et l'environnement.

Le principe de réversibilité

Cigéo a pour objectif d'offrir aux prochaines générations une solution pérenne de gestion des déchets les plus radioactifs sur le long terme, tout en leur laissant des options ouvertes. En effet, il est conçu pour être réversible tout au long de son exploitation, pendant au moins 100 ans. Cela repose sur un concept industriel qui permet de garantir que le stockage est flexible et adaptable et que son développement permettra d'intégrer le fruit des progrès scientifiques et technologiques, ainsi que le retour d'expérience acquis au fur et à mesure de l'exploitation du stockage. Enfin, la réversi-

bilité permet de garantir, si cela était décidé, qu'il serait possible de récupérer les colis de déchets radioactifs. Le Conseil constitutionnel a confirmé dans sa décision 2023-1066 QPC du 27 octobre 2023 la constitutionnalité du projet Cigéo⁴.

La construction progressive

La construction de l'installation sera progressive dans le temps. Elle se déroulera par phases de creusement successives définies en fonction des besoins. Ce développement progressif laisse la possibilité de conduire des réévaluations périodiques, d'intégrer le retour d'expérience et le progrès technique et technologique de manière régulière. Cette progressivité offre également aux générations suivantes une souplesse d'évolution dans la conduite du projet pour, par exemple, temporiser ou accélérer la construction, en fonction de leurs choix, de leurs besoins et de leurs contraintes.

Si le projet Cigéo est autorisé, il démarrera, progressivement, par une phase industrielle pilote qui sera elle-même progressive. Cette phase industrielle pilote se décompose en une succession de différentes phases permettant la prise en main de l'installation, de confir-

⁴ https://www.conseil-constitutionnel.fr/decision/2023/20231066_QPC.htm

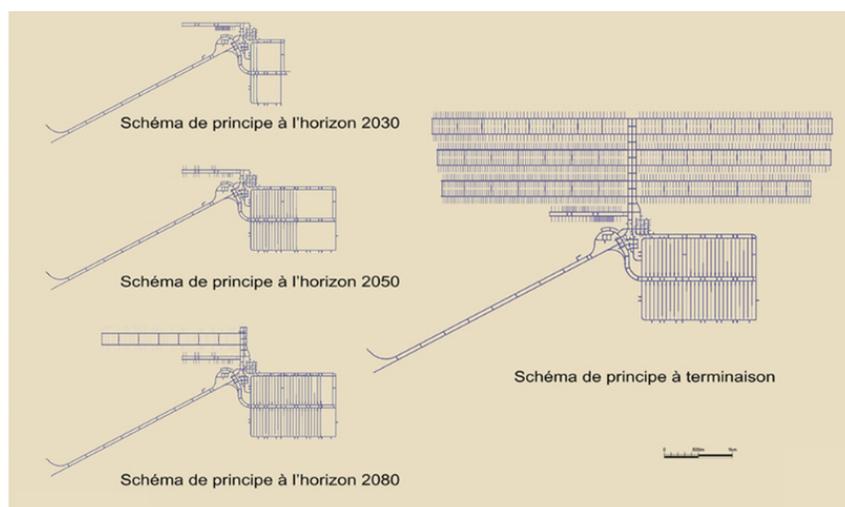


Figure 5 : La phase industrielle de Cigéo.

mer les données et d'acquérir les connaissances nécessaires à l'avancement du projet.

L'adaptabilité

Cigéo est conçu sur la base d'un inventaire de référence qui comprend l'ensemble des déchets HA et MA-VL déjà produits et à produire par les installations actuelles, soit environ 10 000 m³ de déchets HA et 73 000 m³ de déchets MA-VL.

En complément, l'Andra mène des études d'adaptabilité pour vérifier que Cigéo pourrait être adapté si l'inventaire des déchets à stocker venait à évoluer. Pour ce faire l'Andra s'appuie sur un « inventaire de réserve » qui prend en compte de possibles évolutions ayant un impact sur les déchets à stocker dans Cigéo. Les études d'adaptabilité permettent de vérifier que la conception du projet ne contient pas d'éléments rédhibitoires au stockage des déchets compris dans cet inventaire ou que leur stockage n'aurait pas de conséquences sur la sûreté de Cigéo.

Par exemple, la France a fait le choix du recyclage du combustible usé (qui implique la production de MOX) dans la perspective de réacteurs de quatrième génération qui permettraient de valoriser tout l'uranium et le plutonium. Dans le cadre de la démarche d'adaptabilité, l'inventaire de réserve prend en compte le stockage des MOX usés (en cas de monocyclage) ou les combustibles usés (en cas d'abandon du retraitement). Cela permet de ne pas enfermer dans les choix actuels, les générations à venir, celles qui exploiteront Cigéo, et de leur laisser des options ouvertes.

La récupérabilité des colis pendant toute la durée d'exploitation

La récupérabilité des colis de déchets radioactifs dans le cadre de l'exploitation de Cigéo constitue un des principes directeurs de sa conception. D'un point de vue technique et conformément à une demande sociétale forte traduite dans la loi, Cigéo est conçu pour permettre la reprise des colis pendant toute la durée de son exploitation, c'est-à-dire pendant plus d'une centaine d'années.

L'impact de nouveaux réacteurs sur les filières de gestion de déchets radioactifs

La question de la gestion des déchets a fait partie intégrante des travaux préalables à la décision de l'État concernant la mise en œuvre de nouveaux réacteurs. Sur sollicitation du Gouvernement dans la perspective du rapport « Travaux relatifs au nouveau nucléaire »⁵ publié en février 2022, l'Andra a réalisé une évaluation technique préliminaire de l'éventuel impact de 6 nouveaux réacteurs EPR sur les filières de stockage de déchets radioactifs en exploitation ou en projet⁶.

Cette évaluation préliminaire de l'Andra se fonde sur les hypothèses figurant dans le rapport du Gouvernement. Elle constitue une pré-analyse technique de la faisabilité du stockage, mais ne préjuge pas des processus réglementaires et démocratiques requis pour la création de nouveaux réacteurs et pour la gestion des déchets induits.

L'impact sur les filières de gestion en exploitation

Le centre de stockage de l'Aube (CSA)

Les volumes supplémentaires de déchets FMA-VC et leur chronique de livraison ne conduisent qu'à un décalage de quelques mois des besoins de renouvellement des capacités de stockage. L'atteinte de la capacité autorisée du CSA interviendrait à l'horizon 2060, échéance peu différente de celle envisagée aujourd'hui sur le périmètre du parc actuel, et avec un écart d'environ 12 mois entre les deux scénarios.

⁵ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2022.02.18_Rapport_nucleaire.pdf

⁶ <https://www.andra.fr/sites/default/files/2022-11/ZNTADG210022.pdf>

Types de déchets MA-VL	Volumes estimés de déchets produits par l'exploitation de 6 EPR2		
	Multi-recyclage	Mono-recyclage	Arrêt du recyclage
CSD-C	1 273 m ³	710 m ³	0 m ³
Déchets activés et/ou contaminés d'exploitation et de démantèlement des réacteurs EPR2 et des autres installations du cycle ¹⁴	2 678 m ³	3 219 m ³	2 574 m ³
Total	3 951 m³	3 929 m³	2 574 m³

Types de déchets HA	Volumes estimés de déchets produits par l'exploitation de 6 EPR2		
	Multi-recyclage	Mono-recyclage	Arrêt du recyclage
CSD-V	1 872 m ³	971 m ³	0 m ³

Figure 6 : Les volumes estimés de déchets MA-VL et HA produits par l'exploitation de 6 réacteurs EPR2.
CSD-C : colis standards de déchets compactés ; CSD-V : colis standards de déchets vitrifiés.

Le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires)

Les volumes supplémentaires de déchets TFA générés par le déploiement des 6 réacteurs EPR2 resteraient relativement faibles le temps de leur exploitation jusqu'aux années 2100, date à laquelle démarreraient les premières opérations de démantèlement. Ces volumes pourraient être absorbés dans le cadre de l'exploitation du Cires jusqu'à environ 2040 (sous réserve de l'obtention de l'autorisation d'augmentation de capacité de stockage, projet « Acaci » actuellement en instruction) puis du futur centre de stockage TFA, dont la nécessité est déjà inscrite dans le PNGMDR.

L'impact sur le projet Cigéo

Les volumes de déchets MA-VL et HA produits par l'exploitation de 6 réacteurs EPR2 varient en fonction de la stratégie de retraitement du combustible considérée.

À titre de comparaison, les volumes inscrits dans l'inventaire de référence de Cigéo sont de l'ordre de 10 000 m³ pour les déchets HA et de 73 000 m³ pour les MA-VL. Ces volumes comprennent les déchets déjà produits et qui seront produits par les installations

nucléaires existantes ou qui disposent de leur autorisation de création, avec l'hypothèse d'une durée de fonctionnement des réacteurs de 50 ans en moyenne et de la poursuite de la stratégie actuelle de fermeture du cycle du combustible.

Dans le cadre des stratégies d'arrêt du recyclage et de monorecyclage, les volumes de combustibles usés produits par 6 réacteurs EPR2 et pouvant être requalifiés en déchets sont les suivants.

L'étude préliminaire n'identifie à ce stade aucun élément technique réhibitoire à leur prise en charge dans Cigéo. La prise en compte des déchets issus de 6 réacteurs EPR supplémentaires conduirait à un allongement de la durée de vie de l'installation et une augmentation de l'emprise du stockage sans remettre en cause sa faisabilité. L'emprise souterraine des ouvrages du centre de stockage Cigéo resterait comprise dans la zone géologique au sein de laquelle se trouve une couche d'argile ayant les propriétés requises. Sur le plan des exigences de sûreté en exploitation et à long terme la prise en compte dans le stockage des déchets de 6 EPR2 ne remet pas en question les modalités actuelles de maîtrise des risques.

Types de combustibles	Nombres estimés d'assemblages combustibles produits par 6 réacteurs EPR2 pouvant être requalifiés en déchets	
	Mono-recyclage	Arrêt du recyclage
UNE	Sans objet	18 720
URE	5 295	1 358
MOX	3 712	0
Total	9 007	20 078

Figure 7 : Volumes estimés de combustibles produits par 6 réacteurs EPR2 et pouvant être requalifiés en déchets.