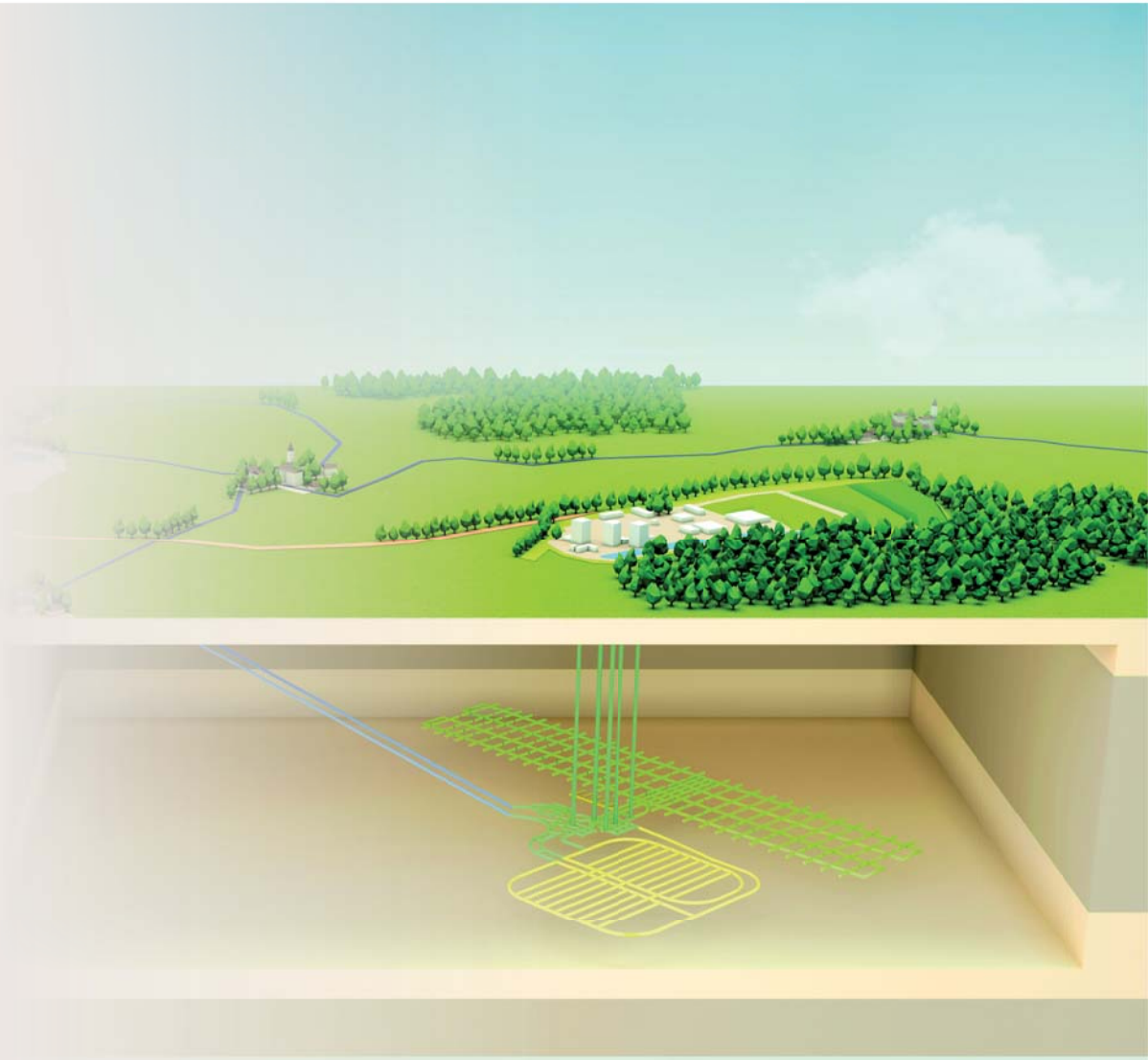
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Décembre 2022

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



PIÈCE 6

Étude d'impact du projet global Cigéo

Volume 2
Justification et description du projet global Cigéo

Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo
Pièce 6 : Étude d'impact du projet global Cigéo
Volume 2 : Justification et description du projet global Cigéo

CG-TE-D-EDM-AMOA-ESE-0000-22-0005/A

Sommaire

1. L'état des lieux de la gestion des déchets radioactifs en France et le besoin d'une solution de gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL 7

1.1 La radioactivité 8
1.1.1 Le phénomène physique 8
1.1.2 Les usages de la radioactivité 9
1.1.3 L'exposition à la radioactivité 9
1.2 Les déchets radioactifs 11
1.2.1 Qu'est-ce qu'un déchet radioactif ? 11
1.2.2 Les principales sources de production des déchets radioactifs 11
1.2.3 La gestion des déchets radioactifs 12
1.2.4 Les volumes, activités et répartitions des différentes catégories de déchets par niveaux d'activité 15
1.3 Les déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) 16
1.3.1 La présentation des déchets HA et MA-VL 16
1.3.2 La gestion actuelle des déchets HA et MA-VL en France 16
1.3.3 La dangerosité des déchets HA et MA-VL 18
1.3.4 Les volumes de déchets radioactifs HA et MA-VL à gérer 20
1.4 Le contexte de la gestion durable des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) 25

2. Les solutions de substitution examinées et la justification des principales raisons techniques et environnementales des choix effectués 27

2.1 Les exigences de protection pour la santé de l'homme et de l'environnement à prendre en compte 28
2.2 Le choix du stockage géologique parmi les différentes pistes de gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL 29
2.2.1 Le contexte 29
2.2.2 L'entreposage de longue durée des déchets 29
2.2.3 La réduction de la dangerosité des déchets par la transmutation 31
2.2.4 L'envoi des déchets dans l'espace 34
2.2.5 L'évacuation des déchets dans les fonds marins et dans les calottes glacières 35
2.2.6 Le stockage des déchets dans le milieu géologique continental 36
2.2.7 La synthèse comparative des modes de gestion vraisemblables des déchets HA et MA-VL envisagés 45
2.2.8 La voie du stockage en formation géologique profonde est adoptée internationalement 55
2.2.9 La poursuite des recherches sur les solutions alternatives 57
2.3 Le choix français du stockage des déchets radioactifs HA et MA-VL dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien 58
2.3.1 Le choix technique initial de stockage des déchets HA et MA-VL dans la formation du Callovo-Oxfordien dans le sous-sol des départements de la Meuse et de la Haute-Marne 58
2.3.2 Les travaux et investigations menés pour confirmer le choix technique initial du stockage des déchets HA et MA-VL dans la formation du Callovo Oxfordien 61
2.3.3 Le Parlement et le gouvernement confirment le choix du stockage des déchets HA et MA-VL en couche géologique profonde 70
2.3.4 La poursuite de l'engagement des départements de Meuse et Haute-Marne pour l'accueil d'un stockage en couche géologique profonde 73
2.4 Les choix d'implantation du centre de stockage Cigéo et des autres opérations associées 74
2.4.1 Les choix d'implantation du centre de stockage Cigéo 74
2.4.2 Les choix d'implantation des autres opérations associées à la création du centre de stockage Cigéo 97
2.5 Les principaux choix techniques et environnementaux effectués pour la conception du centre de stockage Cigéo 108
2.5.1 Les choix d'aménagement du centre de stockage 108
2.5.2 Les choix de conception liés à la sûreté des installations ainsi qu'à l'évolution progressive des connaissances scientifiques et technologiques 111
2.5.3 Les choix de conception environnementale du centre de stockage Cigéo 123
2.6 Un projet développé en dialogue avec la société 136
2.6.1 L'information et la communication locale 136
2.6.2 Le dialogue et la concertation 137
2.6.3 La contribution de l'Andra au dispositif de santé publique 145
2.6.4 Les enseignements de la concertation relative au centre de stockage Cigéo 145
2.7 Pourquoi engager la réalisation du centre de stockage Cigéo maintenant ? 146
2.7.1 Le stockage géologique est le seul mode de gestion à maturité pour la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs les plus dangereux (déchets HA et MA-VL) 146
2.7.2 Le projet de centre de stockage Cigéo permet d'avancer prudemment et d'offrir aux générations suivantes un mode de gestion durable des déchets HA et MA-VL 147
2.7.3 Le risque de la perte de compétence 147
2.7.4 La construction et l'exploitation du centre de stockage Cigéo ne s'opposent pas aux autres voies complémentaires de gestion 148
2.7.5 Le projet de centre de stockage Cigéo ne préempte pas les décisions des générations futures 148

3. La description des installations du projet global Cigéo en fonctionnement 151

3.1 Les opérations constituant le projet global Cigéo 152
3.2 Le centre de stockage Cigéo sous maîtrise d'ouvrage Andra 153
3.2.1 La présentation générale 153
3.2.2 L'INB Cigéo objet de la demande d'autorisation de création 166
3.2.3 La zone descenderie 175
3.2.4 La zone puits 191
3.2.5 La zone d'implantation des ouvrages souterrains 207
3.2.6 La liaison intersites 222
3.2.7 L'installation terminale embranchée 223
3.3 Les autres opérations du projet global Cigéo, nécessaires à la réalisation et à l'exploitation du centre de stockage, menées par l'Andra et par d'autres maîtres d'ouvrage 226

3.3.1 L'opération « alimentation électrique » 226
3.3.2 L'opération « adduction d'eau » 235
3.3.3 L'opération « mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 » 237
3.3.4 L'opération « déviation de la route départementale D60/960 » 240
3.3.5 L'opération « expédition et transport des colis de déchets » 243
3.3.6 Les opérations de « caractérisation et surveillance environnementale » 246

4. Le phasage du projet global Cigéo et la réversibilité du stockage des déchets radioactifs HA et MA-VL 251

4.1 Les phases temporelles successives de déploiement du projet global Cigéo 252
4.1.1 La phase d'aménagements préalables 254
4.1.2 La phase de construction initiale 254
4.1.3 La phase de fonctionnement 254
4.1.4 La phase de démantèlement et de fermeture 255
4.1.5 Les phases de surveillance et de post-surveillance 256
4.2 La phase industrielle pilote 257
4.2.1 L'origine de la phase industrielle pilote et son inscription dans la réglementation 257
4.2.2 Les apports techniques de la phase industrielle pilote 257
4.2.3 Les apports de la phase industrielle pilote en termes de gouvernance 257
4.2.4 Les impacts environnementaux de la phase industrielle pilote 258
4.3 La réversibilité du stockage 259
4.3.1 Le concept de réversibilité et les exigences réglementaires 259
4.3.2 Le concept de progressivité de la construction 260
4.3.3 Le concept de flexibilité de l'exploitation 260
4.3.4 Le concept d'adaptabilité de la conception 262
4.3.5 Le concept de récupérabilité des déchets 262

5. Les principaux travaux et leurs modalités d'exécution 265

5.1 Les travaux en phase d'aménagements préalables 266
5.1.1 Les travaux relatifs au centre de stockage Cigéo 266
5.1.2 Les travaux hors du centre de stockage Cigéo 267
5.2 Les travaux en phase de construction initiale 270
5.2.1 Les travaux relatifs au centre de stockage Cigéo 270
5.2.2 Le déploiement des installations temporaires de chantier 271
5.2.3 Les installations de chantier spécifique 271
5.2.4 La gestion des matériaux excavés de la zone « travaux » de la zone puits 272
5.2.5 L'ouvrage de protection des remontées de nappes phréatiques 272
5.3 Les travaux en phase de fonctionnement 273
5.3.1 L'ouvrage de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal (ETH) 273
5.3.2 Le bâtiment nucléaire de surface EP2 273
5.3.3 Les déconstructions/constructions de certains bâtiments et ouvrages de surface 273
5.3.4 L'extension des ouvrages souterrains et la gestion des matériaux excavés de la zone « travaux » de la zone puits 273
5.4 Les travaux en phase démantèlement et fermeture 274

6. L'estimation des consommations de ressources et des émissions et résidus attendus 275

6.1 Les consommations de ressources 276
6.1.1 L'énergie 276
6.1.2 L'eau 277
6.1.3 Les matériaux de construction 278
6.2 Les émissions et résidus attendus 279
6.2.1 Les terres et matériaux excavés 279
6.2.2 Les émissions atmosphériques 281
6.2.3 Les émissions liquides 284
6.2.4 Les émissions dans le sol et le sous-sol 287
6.2.5 Les émissions sonores 287
6.2.6 Les émissions vibratoires 289
6.2.7 Les émissions lumineuses 290
6.2.8 Les émissions olfactives 290
6.2.9 Les rayonnements ionisants 290
6.2.10 Champs électriques et magnétiques 290
6.2.11 Les déchets 291

Tableau de traçabilité des principales évolutions de fond de l'étude d'impact 295

Tables des illustrations 299

Références bibliographiques 303

Préambule

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

	ÉTUDE D'IMPACT	
RNT	Résumé non technique de l'étude d'impact	
VOLUME I	Introduction et contexte réglementaire	
VOLUME II	**Justification et description du projet global Cigéo**	
VOLUME III	État initial de l'environnement et facteurs susceptibles d'être affectés par le projet	
	Partie 1 : chapitres 1 à 5	1 - Méthodologie d'analyse de l'état initial/2 – Atmosphère/3 – Sol/4 - Sous-sol/5 - Eaux
	Partie 2 : chapitres 6 à 8	6 - Biodiversité et milieu naturel/7 - Population, emploi, activités économiques et habitat/8 - Activités agricoles et sylvicoles
	Partie 3 : chapitres 9 à 17	9 – Réseaux/10 - Déchets radioactifs et conventionnels/11 – Risques/12 - Infrastructures de transport/13 - Cadre de vie/14 - Paysage, patrimoine culturel, tourisme et activités de loisirs/15 - Planification territoriale et aménagement du territoire/16 - Interactions entre les différents milieux de l'environnement/17 - Synthèse des facteurs susceptibles d'être affectés par le projet global Cigéo et hiérarchisation des enjeux
	Partie 4	Annexes au volume III
VOLUME IV	Évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences	
	Partie 1 : chapitres 1 à 5	1 - Méthodologie d'analyse des incidences/2 – Atmosphère/3 – Sol/4 - Sous-sol/5 - Eaux
	Partie 2 : chapitres 6 à 8	6 - Biodiversité et milieu naturel/7 - Emploi, activités économiques, population et habitat/8 - Activités agricoles et sylvicoles
	Partie 3 : chapitres 9 à 22	9 – Réseaux/10 - Déchets radioactifs et conventionnels/11 – Risques/12 - Infrastructures de transport/13 - Cadre de vie/14 - Paysage, patrimoine culturel, tourisme et activités de loisirs/15 - Planification territoriale et aménagement du territoire (y compris urbanisme) - Compatibilité avec les documents de planification territoriales/16 - Interactions et effets cumulés/17 - Meilleures techniques disponibles/18 - Incidences des opérations de démantèlement et de fermeture et incidences après fermeture définitive/19 - Nature et modalités de suivi des mesures environnementales et de surveillance/20 - Estimation des dépenses liées aux mesures prises pour l'environnement/21 - Évolution de l'environnement en cas de mise en œuvre du projet et en son absence/22 - Synthèse des incidences du projet global Cigéo sur l'environnement
	Partie 4	Annexes au volume IV
VOLUME V	Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000	
VOLUME VI	Évaluation des incidences sur la santé humaine	
VOLUME VII	Présentation des méthodes de réalisation de l'étude d'impact	

Le présent **volume II** a pour objet de justifier et décrire les différentes opérations qui composent le projet global Cigéo, objet de la présente étude d'impact. Il présente successivement :

- un état des lieux de la gestion des déchets radioactifs en France, dont les déchets radioactifs HA et MA-VL, et la justification du besoin d'une solution de gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL ;
- les solutions de substitution au stockage en couche géologique profonde des déchets HA et MA-VL examinées et la justification des principales raisons techniques et environnementales des choix effectués dans le cadre du projet global Cigéo ;
- la description des installations du projet global Cigéo en fonctionnement incluant le centre de stockage Cigéo (dont son installation nucléaire de base) et les installations des autres opérations qui lui sont associées ;
- le phasage du projet global Cigéo et le principe de réversibilité du stockage des déchets HA et MA-VL retenu pour la conception du centre de stockage Cigéo ;
- les principaux travaux menés dans le cadre du projet global Cigéo et leurs modalités d'exécution, toutes phases confondues ;
- les éléments relatifs à l'estimation des consommations de ressources et des émissions et résidus attendus dans le cadre du projet global Cigéo.

ÉTUDE D'IMPACT ET PROJET GLOBAL CIGÉO

La présente étude d'impact jointe au dossier de demande d'autorisation de création (DAC) du centre de stockage Cigéo est la première actualisation de l'étude d'impact du projet global Cigéo. La version initiale était jointe au dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo, délivrée en juillet 2022 (1). Cette nouvelle version apporte notamment plus de détails sur les incidences de la création de l'installation nucléaire de base (INB).

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

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

Au stade de cette première actualisation de l'étude d'impact, les opérations des autres maîtres d'ouvrages liées au fonctionnement du centre de stockage Cigéo ne sont pas aux mêmes stades d'avancement de leurs conceptions et de leurs processus de concertation et de validation. L'analyse de leur impact est donc proportionnée à leur stade d'avancement respectif. Une des évolutions majeures de cette première actualisation est l'intégration des éléments en lien avec l'étude de maitrise des risques (cf. « Pièce 8 – Étude de maîtrise des risques » (2) de la présente demande d'autorisation de création (DAC) de l'INB Cigéo), qui présente l'inventaire des risques de l'installation projetée ainsi que l'analyse des dispositions prises pour prévenir ces risques et des mesures propres à limiter la probabilité des accidents et leurs effets.

Compte tenu des nombreuses autorisations qui sont nécessaires à la réalisation du projet global Cigéo (autorisation de création d'une installation nucléaire de base, autorisations environnementales, permis de construire...), la présente étude d'impact sera actualisée préalablement à chaque dépôt de demande d'autorisation à venir. Ces actualisations permettront d'assurer la qualité de l'évaluation des incidences environnementales du projet global Cigéo, à chaque étape de sa conception et de sa réalisation.

Les maîtres d'ouvrage assureront collectivement, au travers desdites actualisations, l'évaluation des incidences du projet global Cigéo, y compris la définition des mesures d'évitement, de réduction, et le cas échéant de compensation.

1

L'état des lieux de la gestion des déchets radioactifs en France et le besoin d'une solution de gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL

1.1 La radioactivité 8

1.2 Les déchets radioactifs 11

1.3 Les déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) 16

1.4 Le contexte de la gestion durable des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) 25

Le présent chapitre a pour objectif de présenter l'état des lieux de la gestion des déchets radioactifs en France, lequel justifie le besoin d'une solution de gestion durable des déchets les plus dangereux. Pour ce faire, il présente successivement :

- un rappel sur la notion de radioactivité (phénomène physique, usages de la radioactivité, conséquences de l'exposition à la radioactivité) ;
- un état des lieux de la gestion de déchets radioactifs en France (nature et origine des déchets, modalités de gestion actuelle, volumes à gérer) ;
- une description de la typologie et du volume des déchets les plus dangereux pour lesquels une solution de gestion durable, sur le très long terme, doit être étudiée.

1.1 La radioactivité

1.1.1 Le phénomène physique

La radioactivité est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'Univers (il y a des milliards d'années) lorsque les atomes se sont formés. Tous bâtis sur le même modèle, les noyaux de ces atomes n'ont pourtant pas les mêmes propriétés.

Les atomes sont composés de trois types de particules :

- les protons, chargés positivement, présents dans le noyau ;
- les neutrons, non chargés, également présents dans le noyau ;
- les électrons, chargés négativement, qui gravitent autour du noyau.

Tous les éléments chimiques identifiés dans le tableau de Mendeleïev ont des isotopes.

Les isotopes sont des atomes de même nature chimique tel que l'hydrogène (H), le chlore (Cl), le Strontium (Sr), le fer (Fe)...) dont le noyau possède le même nombre de protons caractérisant l'élément chimique, mais un nombre différent de neutrons caractérisant chaque isotope (ex : ^{56}Fe, ^{55}Fe, ^{60}Fe, etc.).

À titre d'illustration, le fer possède 28 isotopes et l'hydrogène en présente trois : l'hydrogène « classique » (H), le deutérium (^{2}H) et le tritium (^{3}H) sont des isotopes qui possèdent tous un proton (cf. Figure 1-1). L'hydrogène « classique » ne possède pas de neutron, le deutérium en possède un et le tritium en possède deux.

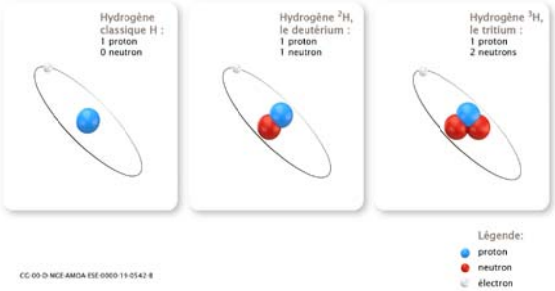


Figure 1-1 Isotopes de l'hydrogène

De son côté, l'uranium a 17 isotopes qui possèdent tous 92 protons, mais dont le nombre de neutrons varie entre 125 et 150. Seulement trois sont présents naturellement sur terre : l'uranium 238 (^{238}U) avec 146 neutrons, l'uranium 235 (^{235}U) avec 143 neutrons et l'uranium 234 (^{234}U) avec 142 neutrons. L'uranium 238 représente 99 % de l'abondance naturelle en uranium.

Les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques, mais des propriétés physiques différentes.

Certains isotopes sont stables et restent identiques à eux-mêmes. C'est le cas par exemple de l'hydrogène et du deutérium. D'autres sont instables et vont se désintégrer, c'est-à-dire qu'ils vont émettre un rayonnement et devenir un atome de nature différente, pour acquérir une meilleure stabilité. C'est le cas par exemple du tritium. Cette désintégration peut conduire à créer un élément stable (ex : ^{56}Fe) ou un nouveau radionucléide qui se désintègrera en un autre élément stable ou radioactif et ainsi de suite. C'est ce qui est appelé la décroissance radioactive.

En se désintégrant, ces atomes - qu'on appelle radionucléides - expulsent de l'énergie sous forme de rayonnement et/ou de particules. Ce phénomène, appelé « radioactivité », est illustré sur la figure 1-2. Différents types de rayonnements/particules peuvent être émis lors de la désintégration des radionucléides, par exemple les rayonnements alpha (α), bêta (β) et gamma (γ). En plus des rayonnements, une certaine quantité d'énergie peut aussi être éliminée sous forme de chaleur[1].

Figure 1-2 Illustration de différents types de rayonnements pouvant être émis par les radionucléides

L'unité internationale de mesure de la radioactivité est le Becquerel (Bq). Le nombre de Becquerel correspond au nombre de désintégrations qui se produisent à chaque seconde au sein d'une certaine masse de matière contenant des radionucléides. À titre d'exemple, l'activité naturelle du corps d'un adulte de 70 kg est de l'ordre de 8 000 Bq à 10 000 Bq. Cela signifie que 8 000 atomes à 10 000 atomes se désintègrent à chaque seconde dans son corps.

On appelle « période » radioactive le temps au bout duquel une quantité d'un même radionucléide est divisée par deux, suite aux désintégrations qu'il a subies. Elle est très variable en fonction des radionucléides. À titre d'exemple, une quantité donnée d'iode 131 (^{131}I) se divise par deux en huit jours, alors qu'il faut 5 700 ans pour le carbone 14 (^{14}C).

» LA RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

La radioactivité est un phénomène physique naturel. Elle peut aussi être générée artificiellement par des activités humaines.

En 1934, Irène et Frédéric Joliot Curie ont mis en évidence la radioactivité artificielle en bombardant une feuille d'aluminium avec des noyaux d'hélium. Ils obtinrent artificiellement le phosphore 30, isotope à période très courte (environ trois minutes).

De façon générale, la radioactivité artificielle consiste à créer des noyaux radioactifs qu'on ne trouve pas spontanément dans la nature au moyen d'un accélérateur de particule ou d'un réacteur nucléaire. Les radionucléides créés artificiellement sont largement utilisés dans le domaine médical pour l'imagerie.

[1] Certains isotopes du plutonium, du strontium, du curium ou de l'américium présents dans certains déchets radioactifs, sont connus pour dégager des quantités significatives d'énergie thermique lors de leur désintégration.

1.1.2 Les usages de la radioactivité

Depuis sa découverte par Henri Becquerel, Marie et Pierre Curie au tournant du XXème siècle, la radioactivité a donné lieu à de nombreuses applications.

La radioactivité est utilisée principalement dans cinq secteurs économiques :

- la production d'électricité : centrales nucléaires et usines pour la fabrication et le traitement des combustibles nucléaires utilisés par les centrales ;
- la défense nationale : activités liées à la force de dissuasion, à la propulsion nucléaire de certains navires ou sous-marins et à la recherche associée ;
- l'industrie classique : utilisation de sources radioactives pour diverses applications (contrôle des soudures, stérilisation du matériel médical, stérilisation et conservation de produits alimentaires...) ;
- la recherche : principalement la recherche menée dans le domaine du nucléaire par le CEA, mais aussi la physique des particules, l'agronomie, la chimie et la biologie ;
- le domaine médical : diagnostics, traitements et recherches associées.

Comme toute activité humaine, ces utilisations produisent des déchets, dont certains sont radioactifs, c'est-à-dire qu'ils contiennent des radionucléides.

1.1.3 L'exposition à la radioactivité

1.1.3.1 L'exposition et ses conséquences

Lorsqu'un rayonnement traverse un matériau ou un être vivant, il peut y déposer tout ou partie de son énergie. On dit qu'il délivre une « dose » d'énergie dans le matériau. Les principaux rayonnements produits par la radioactivité sont susceptibles de générer des ions lors de la traversée d'un matériau, c'est pourquoi ils sont dits « ionisants ».

Un matériau qui absorbe l'énergie de rayonnements ionisants est dit « irradié ». La dose absorbée varie selon le niveau de radioactivité (en Bq) de la source de rayonnement, la distance à laquelle le matériau irradié se trouve de la source et les écrans éventuels que les rayonnements doivent traverser (cf. Figure 1-3).

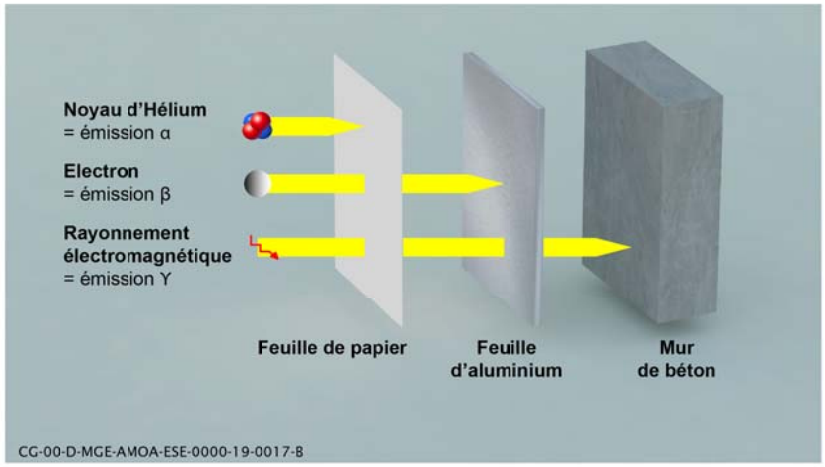


Figure 1-3 Schéma de l'atténuation par des écrans de différents rayonnements ionisants

Le gray est l'unité internationale de mesure de la « dose absorbée ». La dose absorbée correspond à la quantité d'énergie absorbée par une masse donnée de matière lorsqu'elle est exposée à des rayonnements.

L'exposition aux rayonnements ionisants peut causer des dommages aux organismes vivants. C'est pour cette raison que les applications qui utilisent la radioactivité présentent des dangers spécifiques. Le risque généré par l'exposition aux rayonnements ionisants dépend de la dose absorbée par l'organisme, mais aussi du type de rayonnement et de la sensibilité particulière à ces rayonnements des tissus ou organes vivants exposés.

Pour prendre en compte le risque sanitaire de l'exposition aux rayonnements ionisants, des pondérations sont apportées à la mesure de la dose absorbée. Le gray (dose absorbée quel que soit le type de matériau) se traduit alors en sievert, unité internationale de mesure de la « dose efficace » ou « dose efficace absorbée » par un organisme vivant. C'est le sievert qui est utilisé pour la radioprotection et pour l'évaluation des impacts sur la santé. Toutefois, cette unité est très grande et, en pratique, ce sont souvent ses sous-multiples qui sont rencontrés : le millisievert (1 mSv = 0,001 Sv) ou le microsievert (1 µSv = 0,000 001 Sv).

1.1.3.2 Les niveaux d'exposition à la radioactivité en France

Il existe deux grands types de sources d'exposition à la radioactivité.

Les sources naturelles :

- rayonnements d'origine cosmique ;
- rayonnements provenant d'éléments radioactifs présents naturellement dans les aliments ou dans le sol. Par exemple, le granite contient des traces d'uranium et émet du radon, un gaz radioactif naturel.

L'exposition aux sources naturelles dépend principalement des lieux d'habitation et des modes de vie. Ainsi, le personnel navigant des compagnies aériennes est significativement exposé aux rayons cosmiques.

Les sources artificielles :

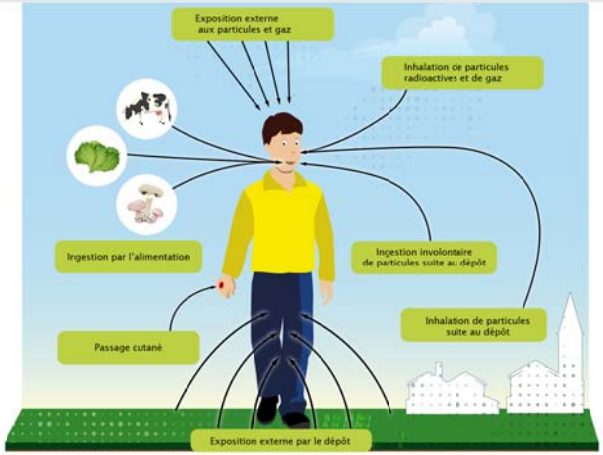
- rayonnements utilisés pour des activités médicales ;
- rayonnements provenant des activités des installations nucléaires (centrales nucléaires...).

L'exposition aux sources artificielles concerne principalement les personnels de santé ainsi que les travailleurs des installations nucléaires. Les patients soumis à des examens d'imagerie médicale, comme une radiographie ou un scanner, sont également concernés. Les essais atmosphériques d'armes nucléaires et les accidents d'installations nucléaires (Tchernobyl, Fukushima...) ont disséminé des radionucléides dans l'environnement qui constitue également une source d'irradiation (3).

» L'EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ PEUT SE FAIRE DE PLUSIEURS MANIÈRES (CF. FIGURE 1-4)

On parle **d'irradiation ou d'exposition externe** lorsqu'une personne se trouve exposée à des rayonnements émis par une source radioactive située à l'extérieur du corps. Dans ce cas, l'exposition est réduite, voire cesse, dès lors que la source de radioactivité est éloignée de la personne ou si un écran est interposé entre la personne et la source.

On parle **de contamination ou d'exposition interne** lorsqu'une personne est exposée à des rayonnements émis par des éléments radioactifs qui ont pénétré à l'intérieur de son organisme. Ceci peut se produire par inhalation de substances radioactives présentes dans l'air, par ingestion d'aliments contenant des substances radioactives ou par transfert à travers la peau. Lors d'une contamination, l'exposition aux substances radioactives se poursuit tant que la source est à l'intérieur ou au contact du corps.



CG-03-D-MGE-AMOA-ESE-0000-19-0360-B

Figure 1-4 Schéma des voies d'exposition à la radioactivité

En France métropolitaine, l'exposition moyenne aux différentes sources de radioactivité représente une dose efficace absorbée par le corps entier de 4,5 millisieverts par an (mSv.an^{-1}) (4). Comme le montre la figure 1-5 :

- cette dose est principalement liée à la radioactivité d'origine naturelle : inhalation de radon, exposition à la radioactivité naturelle du sol, ingestion d'eau et d'aliments et exposition aux rayonnements cosmiques (2,9 mSv.an^{-1}) ;
- elle est ensuite liée aux expositions lors des diagnostics médicaux (1,6 mSv.an^{-1}) ;
- enfin, la part résultant des installations nucléaires industrielles et militaires est très faible (0,02 mSv.an^{-1}), dont environ 0,01 mSv.an^{-1} pour les installations nucléaires industrielles, la limite réglementaire d'exposition du public pour ce type d'activité industrielle étant de 1 mSv.an^{-1}.

CG-00-3-MGE-AMOA-ESE-0000-19-0071-A

Figure 1-5 Valeurs moyennes d'expositions aux sources de radioactivité en France en 2021 (source IRSN) (5)

[2] En cas de situation d'urgence radiologique, les valeurs seuils de mise à l'abri et d'évacuation de la population sont fixées respectivement à 10 mSV et à 50 mSv par la décision n° 2009-DC-0153 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 18 août 2009 (7) et reprises par l'article D 1333-84 du code de l'environnement.

1.1.3.3 Les limites associées aux effets sur la santé de l'exposition à la radioactivité

L'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) précise les risques liés à l'exposition aux rayonnements (6).

La limite d'exposition du public est de 1 mSv.an^{-1} en dehors des expositions médicales et naturelles. Pour les travailleurs du nucléaire, la limite réglementaire d'exposition est en France de 20 mSv.an^{-1}.

En cas d'accident nucléaire, à partir d'une exposition de 10 mSv, l'autorité compétente préconise une mise à l'abri des populations. Cette dose représente environ deux fois la dose annuelle moyenne totale reçue par la population française et trois fois la dose annuelle moyenne due à la radioactivité d'origine naturelle (cf. Chapitre 1.1.3.2 du présent volume). Au-delà de 50 mSv[2], l'évacuation est recommandée. Cela représente 15 fois la dose annuelle moyenne reçue par la population française.

Pour un niveau inférieur à 100 mSv, aucun effet à long terme sur la santé n'a été démontré. Les études n'ont pas établi de façon indiscutable l'existence d'une relation entre dose de rayonnements reçus et risque de cancers ou maladies non cancéreuses notamment en raison des incertitudes qui accompagnent ce type d'étude.

Au-delà de 100 mSv, des effets à long terme des rayonnements ionisants ont été démontrés par des études épidémiologiques (étude des populations d'Hiroshima et de Nagasaki). Ces études menées pendant plus de 60 ans sur près de 90 000 survivants des bombardements nucléaires ont montré avec certitude que le risque de cancers augmente de manière significative chez les personnes ayant reçu une dose de rayonnements ionisants supérieure à 100 mSv.

Synthèse – La radioactivité

La radioactivité est un phénomène physique pouvant être d'origine naturelle (rayonnements d'origine cosmique ou provenant d'éléments radioactifs présents naturellement dans les aliments ou dans le sol), ou d'origine artificielle.

Différents secteurs économiques utilisent les propriétés de la radioactivité et produisent des déchets radioactifs. Il s'agit de :

- la production d'électricité ;
- la défense nationale ;
- l'industrie classique ;
- la recherche ;
- le domaine médical.

L'exposition à la radioactivité peut causer des dommages aux organismes vivants. Le risque généré par l'exposition aux rayonnements ionisants dépend de la dose absorbée par l'organisme, mais aussi du type de rayonnement et de la sensibilité particulière des tissus ou organes vivants exposés.

En France métropolitaine, l'exposition moyenne aux différentes sources de radioactivité représente une dose efficace absorbée par le corps entier de 4,5 millisieverts par an (mSv.an^{-1}) (8). Cette dose est principalement liée à la radioactivité d'origine naturelle, mais également aux expositions lors des diagnostics médicaux. La part résultant des installations nucléaires industrielles est très faible (0,01 mSv).

1.2 Les déchets radioactifs

1.2.1 Qu'est-ce qu'un déchet radioactif ?

Selon le code de l'environnement, un déchet est défini comme « *toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* » (article L. 541-1-1 du code de l'environnement). Un déchet est considéré comme « *ultime* », s'il n'est plus susceptible d'être « *réutilisé ou valorisé dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux* » (article L. 541-2-1 du code de l'environnement).

Toujours selon le 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* » (article L. 542-1-1 du code de l'environnement). Ces déchets sont produits par les industries utilisant les propriétés de la radioactivité (cf. Chapitre 1.1.2 du présent volume).

Les déchets radioactifs ultimes sont « *des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux* » (article L. 542-1-1 du code de l'environnement).

En fonction de leur mode de production et de leur nature, les déchets radioactifs contiennent, en leur sein ou à leur surface, des radionucléides (uranium, radium, cobalt...) qui émettent des rayonnements nocifs. Les déchets radioactifs sont donc considérés comme des substances dangereuses qui doivent être gérées dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement.

En pratique, les déchets radioactifs sont des substances de natures très diverses. Il s'agit par exemple d'équipements déclassés ou hors d'usage (pompes, filtres, câbles...), de pièces et débris métalliques (coques issues du traitement des combustibles, structures démantelées...), de boues radioactives issues des procédés de décontamination d'effluents et de solutions radioactives.

Au titre de sa mission d'intérêt général, l'Andra réalise et publie périodiquement *l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs*. Cet Inventaire national fournit chaque année une vision aussi complète et exhaustive que possible des quantités de matières et déchets radioactifs présents sur le territoire français. Il est complété tous les cinq ans par des estimations des quantités de déchets à produire selon plusieurs scénarios contrastés liés au devenir des installations nucléaires et à la politique énergétique à long terme de la France.

Selon l'Inventaire national, il existait en France fin 2020 environ 1 700 000 m³ de déchets radioactifs (9).

» DÉFINITION DES TERMES « DÉCHETS RADIOACTIFS » ET « MATIÈRES RADIOACTIVES »

Les principaux termes relatifs aux matières et déchets radioactifs sont définis à l'article L. 542-1-1 du code de l'environnement.

Les **déchets radioactifs** désignent les 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 du code de l'environnement. Les déchets radioactifs ultimes sont des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

Les **matières radioactives** désignent en revanche les substances radioactives pour lesquelles une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement. Par exemple, les combustibles usés comprennent 96 % de matière réutilisable (uranium et plutonium) à partir desquels on peut produire du combustible MOX. Le retraitement des combustibles usés, mis en œuvre à l'usine d'Orano La Hague, consiste à séparer l'uranium et le plutonium, valorisables, des actinides mineurs et produits de fission, qui ne sont pas valorisables et sont gérés en tant que déchets radioactifs (déchets de haute activité).

[3] Dans les combustibles déchargés des réacteurs après utilisation, de l'uranium et du plutonium peuvent être récupérés et réutilisés pour fabriquer de nouveaux combustibles.

1.2.2 Les principales sources de production des déchets radioactifs

Les centrales nucléaires de production d'électricité, les usines qui participent à la fabrication du combustible pour ces centrales et à leur retraitement et les installations de recherche associées sont les principaux producteurs de déchets radioactifs. Les déchets résultent directement de leurs activités, de leur maintenance et, à l'issue de leur fonctionnement, de leur démantèlement.

Plusieurs générations successives de réacteurs nucléaires ont été construites en France pour la production d'électricité dans les centrales nucléaires :

- la première génération, aujourd'hui arrêtée, comprend neuf réacteurs de type « uranium naturel-graphite-gaz » (UNGG) construits dans les années 1950-1960 :
  - ✓ sur le centre du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) de Marcoule (Gard – réacteurs G1, G2 et G3) ;
  - ✓ sur les sites EDF de Chinon (Indre-et-Loire – réacteurs Chinon A1, A2 et A3), Bugey (Ain – réacteur Bugey 1) et Saint-Laurent-des eaux (Loir-et-Cher – réacteurs Saint-Laurent A1 et A2) ;
- la deuxième génération correspond aux réacteurs à eau pressurisée actuellement en fonctionnement. Elle est constituée de 56 réacteurs en fonctionnement et 2 réacteurs arrêtés en 2020 répartis sur 19 sites, mis en service entre 1977 et 1999. Le premier réacteur de cette génération, mis en service sur le site de Chooz (Ardennes – réacteur Chooz A), est en cours de démantèlement ;
- la troisième génération correspond au réacteur EPR (*Evolutionary Power Reactor*) de Flamanville (Manche) actuellement en construction. Ce type de réacteur appartient aussi à la filière des réacteurs à eau pressurisée.

D'autres types de réacteurs électronucléaires sont aujourd'hui arrêtés. Il s'agit du prototype industriel de réacteur à eau lourde du site EDF de Brennilis (Finistère – réacteur EL 4), des réacteurs à neutrons rapides du site EDF de Creys-Malville (Isère - réacteur Superphénix) et du centre CEA de Marcoule (Gard – réacteur Phénix).

Les usines qui participent à la fabrication et au recyclage du combustible nucléaire permettent notamment d'enrichir l'uranium (pour augmenter sa teneur en ^{235}U), de constituer les assemblages de combustible utilisés dans les réacteurs et de les traiter après utilisation pour en récupérer la part valorisable[3]. Ces opérations sont réalisées dans des installations des groupes Framatome ou Orano, par exemple sur les sites de Romans sur Isère (Drôme, FBFC), Marcoule (Gard, Melox) et de La Hague (Manche).

Selon l'Inventaire national, les déchets radioactifs produits par le secteur électronucléaire (cf. Figure 1-6) au sens large (centrales et usines de fabrication des combustibles) représentent fin 2020 environ 60 % du volume total des déchets radioactifs (9).

Les principales installations de recherche productrices de déchets radioactifs sont exploitées par le CEA, notamment pour la conception de réacteurs de nouvelles générations, pour la gestion des combustibles et des déchets radioactifs et pour la Défense nationale. Parmi les principaux centres du CEA conduisant des activités nucléaires, on peut citer ceux de Marcoule (Gard) et de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Outre les activités du CEA, la recherche menée dans le secteur médical, la physique des particules, l'agronomie, la chimie, la biologie produit elle-aussi des déchets radioactifs. Selon l'Inventaire national, au total, les déchets produits par la recherche représentent fin 2020 environ 27 % du volume total des déchets radioactifs (9).

Le secteur de la défense concerne principalement la force de dissuasion, dont la propulsion nucléaire de certains navires de la Marine nationale et les activités liées aux armes du centre CEA de Valduc (Côte d'Or). Selon l'Inventaire national, les déchets produits par le secteur de la défense représentent fin 2020 environ 9 % du volume total des déchets radioactifs (9).

Les autres activités utilisant la radioactivité (industrie, irradiateurs, diagnostics médicaux...) produisent le restant des déchets radioactifs, soit environ 4 % à fin 2020, selon l'Inventaire national.

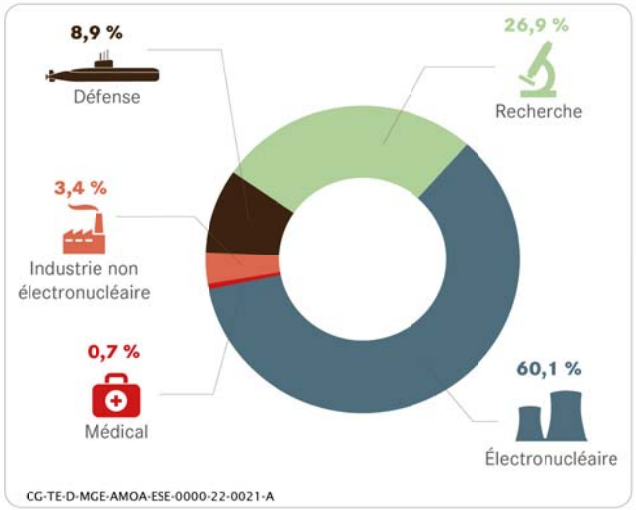


Figure 1-6 *Répartition par secteur économique du volume de déchets (en équivalent conditionné) déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2020 (9)*

1.2.3 La gestion des déchets radioactifs

1.2.3.1 Les approches et stratégies pour la gestion des déchets radioactifs

L'article L. 542-1 du code de l'environnement fixe les objectifs de la gestion durable des déchets radioactifs. Selon cet article, « *la gestion durable des matières et des déchets radioactifs de toute nature, résultant notamment de l'exploitation ou du démantèlement d'installations utilisant des sources ou des matières radioactives, est assurée dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement. La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures.* ».

Lorsqu'ils sont produits, les déchets radioactifs se trouvent sous forme brute, gazeuse, liquide ou solide.

Trois approches ou stratégies pour leur gestion sont décrites par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)[4] :

- « diluer et disperser » ;
- « différer et décroître » ;
- « concentrer et confiner ».

Les « approches » de gestion au sens de l'AIEA sont parfois dénommées « filières », « voies » ou « solutions » de gestion dans les textes français.

L'approche « diluer et disperser » correspond au rejet dans le milieu naturel d'effluents liquides et gazeux. C'est une pratique globalement considérée comme légitime pour la gestion de certains effluents dès lors qu'elle est appliquée dans les limites et conditions fixées par les organismes de réglementation. Le rejet d'effluents dans le milieu naturel est pratiqué par les industries (cheminées des usines, centrales thermiques, rejets de station d'épuration des collectivités...) et par les particuliers (échappement des voitures individuelles, chauffage, assainissement par épandage...). Pour les rejets d'effluents radioactifs gazeux et liquides dans l'environnement, c'est l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui fixe les autorisations pour chaque installation nucléaire après avoir vérifié que leurs caractéristiques le permettent et qu'elles ne portent atteinte ni à la santé des personnes, ni à la qualité de l'environnement. Les exploitants des installations nucléaires sont tenus de réduire l'impact de ces rejets à des valeurs aussi basses que possible (10).

L'approche « différer et décroître » implique souvent de placer temporairement les déchets radioactifs dans une installation d'entreposage afin d'attendre que leur radioactivité décroisse. Elle constitue un mode de gestion durable pour les déchets radioactifs à vie très courte, dont la radioactivité disparait naturellement par décroissance radioactive sur une durée maximale de quelques années. Ils sont ensuite éliminés dans une filière conventionnelle correspondant à leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Pour les autres déchets radioactifs, cette approche permet d'attendre que des conditions de transport ou de disponibilité soient réunies avant leur transfert vers une unité de conditionnement, un autre entreposage d'attente ou une installation de stockage.

L'approche « concentrer et confiner » correspond à la réduction du volume des déchets et au confinement des radionucléides qu'ils contiennent. Le confinement est obtenu en premier lieu grâce à un processus de conditionnement destiné à empêcher ou à réduire considérablement le risque de leur dispersion dans l'environnement.

» DÉFINITION DES TERMES « ENTREPOSAGE » ET « STOCKAGE »

L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement définit l'entreposage de matières ou de déchets radioactifs comme « *l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, avec intention de les retirer ultérieurement* ». Cette définition est équivalente à celles données par la directive européenne du 19 juillet 2011 (11) et par l'AIEA (12).

L'article L. 541-1-1 du code de l'environnement définit également le stockage des déchets radioactifs comme « *l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive [...]* ». La directive européenne du 19 juillet 2011 définit le stockage comme « *le dépôt de combustible usé ou de déchets radioactifs dans une installation sans intention de retrait ultérieur* ». Elle rejoint la définition du stockage définitif donnée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), à savoir « *la mise en place de déchets radioactifs dans une installation ou un emplacement sans intention de les récupérer* » (12).

La notion de stockage se distingue donc de la notion d'entreposage par son caractère potentiellement définitif et par l'absence d'intention de récupérer les déchets dans le futur, au moment où ils sont stockés.

[4] Créée en 1957, l'AIEA a pour mission de promouvoir l'utilisation sûre des technologies nucléaires à des fins pacifiques. C'est une organisation des Nations unies qui regroupait, en janvier 2014, 161 États membres. Les activités de l'AIEA consistent notamment en la rédaction de textes, appelés « normes de sûreté » ou « *Safety Standards* », décrivant les principes et pratiques de sûreté ; les États membres peuvent utiliser ces textes comme base de leur réglementation nationale (Source ASN).

1.2.3.2 Le conditionnement des déchets radioactifs

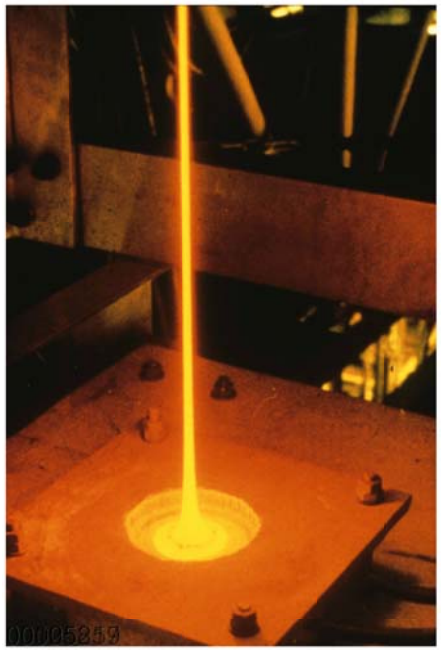


Figure 1-7 *Coulée de verre en fusion contenant des déchets radioactifs de haute activité (Source Orano)*

Le conditionnement représente l'ensemble des opérations consistant à introduire des déchets dans un conteneur[5], où ils sont incorporés, ou non, dans un matériau dit « d'enrobage » (cf. Figure 1-7). Les opérations de conditionnement comprennent par exemple le compactage, la vitrification, la cimentation, le bitumage, la mise en conteneur (cf. Figure 1-8). Elles permettent de constituer des « colis de déchets », dans lesquels les déchets radioactifs sont mis sous une forme convenant à leur transport, leur entreposage et leur stockage.

Figure 1-8 *Exemples de colis de déchets radioactifs – déchets radioactifs de haute activité (HA) vitrifiés à gauche et déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL) cimentés à droite*

La mise en stockage des colis de déchets ajoute à cette approche le confinement des déchets radioactifs sur de grandes échelles de temps, adaptées à leurs caractéristiques physico-chimiques.

1.2.3.3 La classification française des déchets radioactifs et les filières de gestion en France

Il n'existe pas de critère unique permettant de déterminer la nocivité d'un déchet radioactif et la gestion qui lui est appropriée. Pour cela, il est nécessaire d'étudier non seulement la radioactivité des différents radionucléides qu'il contient, mais aussi de prendre en compte sa nature physico-chimique et son éventuelle toxicité chimique. Divers autres facteurs, comprenant notamment l'exposition professionnelle induite, la sûreté à long terme et les aspects socio-économiques, doivent aussi être pris en compte.

Une fois qu'une filière de gestion a été retenue pour un déchet, un ensemble d'opérations adaptées à ses spécificités est mis en œuvre en vue d'assurer sa mise en sécurité définitive conformément aux exigences de l'article L. 542-1 du code de l'environnement. Parmi ces opérations, on peut citer le regroupement, le contrôle, le traitement, le conditionnement, l'entreposage, le transport et le stockage.

Pour identifier la gestion appropriée aux différents déchets radioactifs en fonction de leurs spécificités, la France s'est munie d'une classification (13) qui repose principalement sur le niveau de radioactivité et sur la durée de la période radioactive (cf. Figure 1-9 et chapitre 1.1 du présent volume I) :

- quatre niveaux de radioactivité des déchets radioactifs ont été définis : la très faible activité (TFA), la faible activité (FA), la moyenne activité (MA) et la haute activité (HA) ;
- trois durées de période radioactive ont été retenues : les déchets à vie très courte de période inférieure à 100 jours, les déchets à vie courte de période inférieure à 31 ans et les déchets à vie longue de période supérieure à 31 ans.

[5] Une étape de préparation des déchets peut éventuellement précéder la mise en conteneur (préconditionnement).

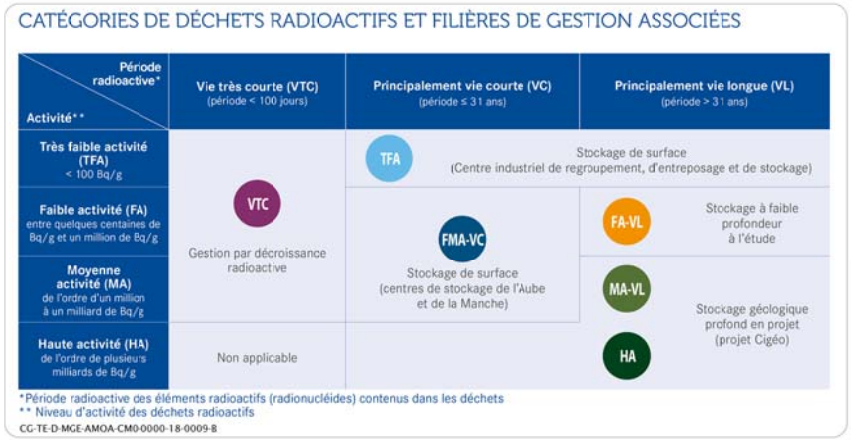


Figure 1-9 *Filières de gestion développées pour les différentes catégories de déchets radioactifs (9)*

Cette classification pose les principes d'orientation d'une catégorie de déchets vers une filière de gestion. Toutefois, un déchet peut très bien relever d'une catégorie de la classification de par ses caractéristiques radiologiques et ne pas être accepté dans la filière correspondante du fait de ses autres caractéristiques : la catégorie du déchet n'est pas obligatoirement assimilable à sa filière de gestion.

Le stockage de déchets radioactifs est une pratique commune dans le monde pour la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs. Parmi les nombreux centres de stockage actuellement en cours d'exploitation dans le monde, on peut citer à titre illustratif les centres d'El Cabril en Espagne, de Forsmark en Suède, de Rokkasho au Japon, de Vaalputs en Afrique du Sud ou d'Andrews dans l'état du Texas.

La France possède trois centres de stockage de déchets radioactifs sous la responsabilité de l'Andra (cf. Tableau 1-1) :

- deux centres situés dans le département de l'Aube, actuellement exploités, qui permettent de stocker en surface les déchets TFA et FMA-VC (cf. Figure 1-10 et figure 1-12) ;
- le centre de stockage de la Manche, exploité de 1969 à 1994, qui permettait également de stocker en surface les déchets TFA et FMA-VC et qui est actuellement en phase de fermeture (cf. Figure 1-11).

Tableau 1-1 *Centres de stockage de déchets radioactifs existants en France*

Déchets radioactifs de très faible activité (TFA)	*Figure 1-10* *Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) dans l'Aube - en exploitation*
Déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)	*Figure 1-11* *Centre de stockage de la Manche (CSM) – centre exploité de 1969 à 1994 – en phase de démantèlement et de fermeture* *Figure 1-12* *Centre de stockage de l'Aube (CSA) – en exploitation*

Les centres de stockage français sont adaptés aux déchets de très faible activité (TFA) et de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) qui constituent plus de 90 % du volume de déchets radioactifs produits chaque année en France.

À ce jour, la France ne dispose pas de centre de stockage pour les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) et pour les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL). Pour compléter le système industriel existant, l'Andra est chargée d'étudier la conception de centres de stockage adaptés à leur prise en charge. Le projet de centre de stockage Cigéo constitue le projet français de centre de stockage des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL).

En l'absence d'un centre de stockage disponible pour leur mise en sécurité définitive, les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) produits par les activités nucléaires françaises sont actuellement entreposés dans des installations d'Orano, du CEA et d'EDF, la plus grande part se trouvant actuellement sur le site Orano de La Hague (Manche) et sur les centres CEA de Marcoule (Gard) et de Cadarache (Bouches-du-Rhône) (cf. Chapitres 1.3.4 du présent volume).

Selon l'Inventaire national, au total, les volumes de déchets entreposés, à fin 2020, sont de 4 160 m³ de déchets HA et de 41 780 m³ de déchets MA-VL (cf. Chapitre 1.3 du présent volume). Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes au terme prévisible de leur exploitation et de leur démantèlement, les déchets déjà produits représentent environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux (9).

1.2.4 Les volumes, activités et répartitions des différentes catégories de déchets par niveaux d'activité

Compte tenu des filières de gestion retenues, les déchets sont regroupés en six grandes catégories (cf. Figure 1-9 en page 14) :

- les déchets à vie très courte (VTC). Leur niveau d'activité varie très rapidement par décroissance radioactive ;
- les déchets de très faible activité (TFA), déchets issus du fonctionnement, de la maintenance et du démantèlement des installations nucléaires (béton, gravats, ferrailles, terres...). Leur niveau d'activité est généralement inférieur à cent becquerels par gramme ;
- les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC), déchets issus du fonctionnement, de la maintenance et du démantèlement des installations nucléaires (gants, vêtements, outils, fibres, boues...). Leur niveau d'activité se situe entre quelques centaines, jusqu'à environ un million de becquerels par gramme ;
- les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), déchets de graphites issus des premières centrales nucléaires, déchets radifères (provenant par exemple de l'extraction de terres rares...). Leur activité est variable en fonction de leur nature (déchets de graphite, déchets radifères...). Elle peut atteindre jusqu'à environ cent mille becquerels par gramme ;
- les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), déchets de structures métalliques entourant les combustibles usés, déchets technologiques liés à la maintenance des installations nucléaires. Leur activité est de l'ordre d'un million à un milliard de becquerel par gramme ;
- les déchets de haute activité, déchets issus principalement du retraitement des combustibles usés. Leur niveau d'activité est de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme.

La figure 1-13 illustre la répartition en volumes et en niveaux de radioactivité des déchets HA, MA-VL, FA-VL, FMA-VC et TFA déjà stockés en France ou destinés à être pris en charge par l'Andra, selon Les essentiels 2022 de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (sur la base des stocks de déchets à fin 2020) (9). La répartition des volumes et des niveaux de radioactivité des déchets montre que la plus grande part des déchets, environ 90 % du volume, est de très faible activité ou de faible activité à vie courte (environ 0,3 % de l'activité totale). En revanche, une part très minoritaire, représentant environ 0,2 % du volume total, concentre à elle seule près de 95 % de la radioactivité totale. En lien direct avec l'approche de « concentration et de confinement », ces déchets de haute activité ont été concentrés pour réduire le volume des déchets à gérer. Ils sont vitrifiés pour confiner les substances radioactives en les bloquant au cœur du matériau vitreux.

Les déchets à vie très courte (VTC), principalement issus des activités médicales et dont la radioactivité disparaît en quelques dizaines de jours et au maximum sur quelques années, ne sont pas pris en charge par l'Andra. Leur volume, environ 2 000 m³, est stable (9). Après entreposage de décroissance, ils sont éliminés dans des filières conventionnelles adaptées à leurs caractéristiques.

Des précisions sur la nature des différentes catégories de déchets sont présentées dans le volume 3 de la « Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté » de la demande d'autorisation de création (DAC) de l'INB Cigéo (14).

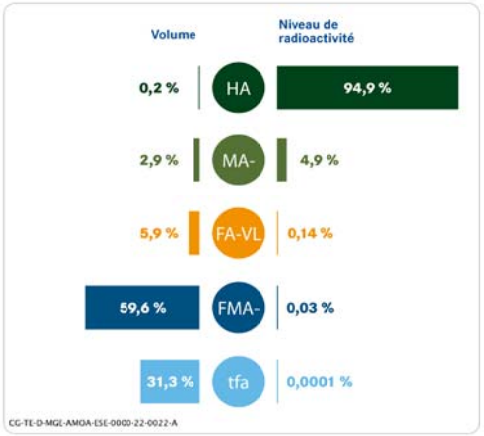


Figure 1-13 Répartition des déchets radioactifs en France à fin 2020 (9)

Selon l'Inventaire national, il existe, à fin 2020, 4 160 m³ de déchets HA et 41 780 m³ de déchets MA-VL français entreposés en France en attente d'une filière durable de gestion (9). Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes, cela représente environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux prévisibles.

Synthèse – Les déchets radioactifs

Les déchets radioactifs sont des substances qui contiennent des éléments radioactifs et émettent des rayonnements qui leur confèrent une dangerosité spécifique en fonction de leur nature et de leur niveau de radioactivité.

La classification française des filières de gestion des déchets radioactifs repose sur deux paramètres permettant de définir le mode de gestion approprié : le niveau de radioactivité et la période radioactive des éléments.

Des filières de gestion durable ont été développées pour la mise en sécurité définitive des déchets de très faible activité (TFA) et pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Environ 90 % des colis de déchets produits peuvent être ainsi stockés dans les centres exploités par l'Andra.

Afin de compléter le système global de gestion durable des déchets radioactifs, l'Andra mène des études pour concevoir des solutions techniques permettant, à terme, une mise en sécurité définitive :

- des déchets radioactifs de faible activité à vie longue (FA-VL) ;
- des déchets radioactifs de haute activité (HA) et des déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL) ; c'est l'objet du projet global Cigéo.

Selon l'Inventaire national, il existe, à fin 2020, 4 160 m³ de déchets HA et 41 780 m³ de déchets MA-VL français entreposés en France en attente d'une filière durable de gestion (9). Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes, cela représente environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux prévisibles.

1.3 Les déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Comme présenté ci-après, la radioactivité et la durée de vie des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) ne permettent pas de les stocker de manière sûre en surface ou à faible profondeur sur le très long terme.

Pour ces déchets, aujourd'hui entreposés en surface, il est donc nécessaire de trouver une solution de gestion durable sur le très long terme ; c'est l'objet du projet global Cigéo.

1.3.1 La présentation des déchets HA et MA-VL

1.3.1.1 Les déchets de haute activité (HA)

Les déchets HA sont essentiellement des résidus extraits des combustibles nucléaires usés lors de leur retraitement (produits de fission et actinides mineurs), qui ont été vitrifiés. Au sein des colis de déchets de haute activité, on distingue les colis de déchets dans lesquels le dégagement de chaleur est modéré et les colis de déchets dans lesquels le dégagement de chaleur est plus important.

Les déchets HA présentent un niveau de radioactivité de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme. Ils sont très radioactifs car ils contiennent des produits de fission et des actinides mineurs formés dans le combustible nucléaire lors de son passage dans le cœur du réacteur nucléaire. Ce sont pour la plupart les résidus non recyclables de la « combustion nucléaire ». Lors du retraitement du combustible nucléaire, ces radionucléides sont séparés du reste du combustible irradié, c'est-à-dire de l'uranium et du plutonium qui constituent sa part valorisable. Dans les déchets HA, il reste quelques traces non séparées d'uranium et de plutonium.

Les déchets HA séparés lors du retraitement sont conditionnés sous forme vitrifiée. Pour cette vitrification, les déchets HA sont d'abord « calcinés » (pour former des oxydes de produits de fission et actinides). Ensuite, les calcinats sont mélangés avec de la fritte de verre et des adjuvants et chauffés à plus de 1 000 °C dans un creuset de vitrification. Le déchet vitrifié chaud est ensuite coulé dans un conteneur en acier inoxydable. Son couvercle en acier inoxydable est soudé.

La vitrification des déchets HA dans les ateliers de vitrification de Marcoule et de La Hague a permis d'améliorer considérablement la sûreté de leur entreposage, en comparaison de la situation antérieure où l'entreposage des déchets HA s'effectuait sous forme liquide, dans des cuves.

Au terme de la vitrification, les déchets initiaux (produits de fission, actinides mineurs et produits d'activation) présents dans un colis de déchets HA représentent environ neuf kilogrammes, soit de l'ordre de 2 % de la masse du colis. Au total, les colis de déchets HA ne représentent que 0,2 % du volume total des colis de déchets radioactifs existants, mais contiennent près de 95 % de leur radioactivité totale.

La grande concentration de la radioactivité dans les déchets HA se traduit par un dégagement thermique élevé, dont une part importante est due à leur teneur en césium 137 (^{137}Cs) et en strontium 90 (^{90}Sr). Ce dégagement thermique décroît d'environ 50 % tous les 30 ans en lien avec la décroissance radioactive de ces radionucléides.

1.3.1.2 Les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Les déchets MA-VL sont principalement des résidus issus des combustibles nucléaires irradiés après retraitement, des composants ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires et de déchets technologiques issus du fonctionnement et de la maintenance des installations nucléaires (centrales nucléaires, laboratoires de recherche, réacteurs expérimentaux, installations liées à la Défense nationale) et du démantèlement de ces différentes installations. Ils se composent principalement :

- de structures métalliques séparées lors du traitement des combustibles nucléaires ;
- de composants métalliques ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires ;
- de déchets issus de la maintenance des installations nucléaires (déchets technologiques, résidus des procédés...) et de leur démantèlement ;
- de résidus des effluents d'exploitation des installations nucléaires.

Les déchets MA-VL présentent un niveau de radioactivité de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme. Ils contiennent, comme les déchets HA, des quantités importantes de radionucléides à période longue.

Les modes de conditionnement des déchets MA-VL sont très variables et adaptés à leurs natures variées. Les principales sont le compactage, le bitumage et la cimentation.

Les déchets MA-VL représentent un peu moins de 3 % du volume total des déchets radioactifs et contiennent près de 5 % de leur radioactivité totale (cf. Figure 1-13) (9).

1.3.2 La gestion actuelle des déchets HA et MA-VL en France

Les déchets HA et MA-VL déjà produits sont actuellement entreposés dans des bâtiments dédiés des installations nucléaires d'EDF, d'Orano et du CEA[6].

L'entreposage des colis de déchets HA et MA-VL s'effectue « à sec ». L'entreposage « sous eau », souvent dénommé entreposage en « piscine », est parfois utilisé pour certains déchets MA-VL en attente de conditionnement[7]. Cela ne constitue néanmoins qu'une pratique marginale en termes de volumes de déchets concernés.

Les protections apportées par les installations d'entreposage de colis de déchets à sec (cf. Figure 1-14 et figure 1-15) sont de plusieurs natures :

- des parois épaisses autour des colis pour empêcher le rayonnement d'atteindre les opérateurs et *a fortiori* le public ;
- des barrières de confinement s'opposant à la dispersion de particules radioactives dans les installations elles-mêmes et dans l'environnement. La première de ces barrières est généralement constituée par le conditionnement du déchet lui-même (conteneur et matrice). Les autres reposent sur les parois du bâtiment et sur son système de ventilation. Les barrières font l'objet d'une surveillance ;
- un contrôle d'accès interdisant à toute personne non avertie de s'approcher des déchets ;
- une résistance des installations d'entreposage aux perturbations naturelles (séismes, phénomènes climatiques, conditions atmosphériques...) et humaines (défaillances, accidents, malveillance...), ainsi qu'aux perturbations apportées par les déchets eux-mêmes (principalement la chaleur dégagée par les déchets HA).

[6] L'entreposage de déchets radioactifs est défini par le code de l'environnement (article L. 542-1-1) comme *« l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer »* (cf. Chapitre 1.2.3 du présent volume de l'étude d'impact).

[7] Les piscines d'entreposage de combustibles usés en attente d'évacuation ou de traitement, notamment celles situées sur les sites des centrales EDF, peuvent accueillir certains déchets MA-VL particuliers non encore conditionnés.

Figure 1-14 Hall d'entreposage de l'atelier de vitrification R7 UP2 800 d'Orano à La Hague © Orano

S'agissant de bâtiments constitués de béton (cf. Figure 1-16) et d'acier et comportant des équipements mécaniques et électriques, les installations d'entreposage ont une durabilité limitée. Le vieillissement et l'obsolescence la restreignent en général à une cinquantaine d'années. Divers entreposages, construits dans les années 1960 ou 1970, sont ainsi en cours de reprise aujourd'hui. Les colis de déchets en sont retirés et ils sont transférés, parfois après modification de leur conditionnement initial[8], vers des installations d'entreposage plus modernes. Pour ces nouvelles installations d'entreposage, une durabilité plus importante est envisagée. Plusieurs dizaines d'années de plus sont visées par leur conception (plusieurs dizaines d'années au-delà de 50 ans).

Des projets de nouveaux entreposages sont développés par les producteurs sur leurs sites. En effet, les capacités d'entreposage actuellement disponibles sur ces sites ne permettront pas de gérer l'ensemble des déchets dont la production régulière est prévue ou ceux qui devront être retirés des installations les plus anciennes. Les besoins en entreposage sont évalués périodiquement et suivis par l'État et les parties prenantes dans le cadre du Plan national pour la gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) (15). Dans son avis du 1er décembre 2020 (16), l'ASN constate « *que les dates de saturation des entreposages existants et les besoins futurs en entreposage pour les 20 prochaines années ont été globalement bien identifiés par les producteurs. Toutefois, les estimations des capacités d'entreposage doivent être consolidées par l'ensemble des producteurs en intégrant des marges pour faire face à d'éventuels aléas sur les filières de gestion des déchets concernés, et ainsi être en mesure d'anticiper les besoins de capacités d'entreposage complémentaires et les procédures d'autorisation correspondantes.* »

Tous les déchets passent, sous une forme ou une autre, par une phase d'entreposage, parfois longue. La gestion des déchets radioactifs actuelle prévoit un système combinant un entreposage puis un stockage définitif. Ce stockage définitif est l'objet du projet global Cigéo.

Le besoin d'installations d'entreposage perdure jusqu'à l'échéance de la mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL, c'est-à-dire jusqu'à la fermeture complète du stockage définitif (cf. Chapitres 4.1.4, 4.3.3 et 2.7.4 du présent volume).

[8] Le reconditionnement des colis de déchets conduit généralement à augmenter leur volume.

» LE PLAN NATIONAL DE GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) a été institué par la loi du 28 juin 2006 (17).

Il « dresse le bilan des modes de gestion existants des matières et des déchets radioactifs et des solutions techniques retenues, recense les besoins prévisibles d'installations d'entreposage ou de stockage et précise les capacités nécessaires pour ces installations et les durées d'entreposage. »

Il fixe les objectifs généraux à atteindre, les principales échéances et les calendriers permettant de respecter ces échéances en tenant compte des priorités qu'il définit. Il détermine les objectifs à atteindre pour les déchets radioactifs qui ne font pas encore l'objet d'un mode de gestion définitif.

Il organise la mise en œuvre des recherches et études sur la gestion des matières et déchets radioactifs.

Il détermine les personnes responsables de sa mise en œuvre ainsi que les indicateurs permettant de surveiller l'avancement de sa mise en œuvre.

Il comporte une estimation des coûts de la gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs, assortie d'un calendrier et mentionnant les hypothèses selon lesquelles cette estimation a été établie. Il précise les mécanismes de financement en vigueur. »

Le code de l'environnement (article L. 542-1-2 II) a fixé trois grandes orientations que le PNGMDR et son décret d'application, qui en établit les prescriptions, doivent respecter :

- la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le retraitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs ;
- les matières radioactives en attente de traitement et les déchets radioactifs ultimes en attente d'un stockage sont entreposés dans des installations spécialement aménagées à cet usage ;
- après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant, pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection, être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde.

Les analyses prospectives, sur lesquelles le plan s'appuie, sont élaborées dans le cadre de la politique énergétique. Le PNGMDR a été publié pour la première fois en 2007 (18), puis a fait l'objet de trois nouvelles éditions en 2010 (19), en 2013 (20), en 2016 (15) et la dernière a été élaborée en 2022 conformément aux dispositions de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement, qui prévoit une mise à jour quinquennale du plan.

Ce document est désormais porté par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) pour le ministère de la Transition écologique.

Dans le cadre de l'élaboration de la cinquième édition du PNGMDR, un débat public a été organisé par la Commission nationale du débat public (CNDP) du 17 avril au 24 septembre 2019 (21) (cf. Chapitre 2.6.2 du présent volume). Suite à ce débat public, le projet de PNGMDR a été élaboré et a fait l'objet d'une consultation publique (22), d'un avis de l'Autorité environnementale (23) ainsi que d'un avis de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) (16). Dans ses grandes orientations, la cinquième édition du PNGMDR prévoit notamment la poursuite des travaux engagés sur la filière de gestion des déchets HA et MA-VL.

Le PNGMDR 2022-2026 fait l'objet du décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par 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 (24) et de l'arrêté du 9 décembre 2022 pris en application du décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par 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 (25).

Figure 1-15 *Exemple d'installation d'entreposage de déchets MA-VL : installation STE3 du site Orano de La Hague (photo prise à travers un hublot de protection) © Orano*

La mise en œuvre des meilleures technologies disponibles en matière de génie civil et de matériaux, l'utilisation du retour d'expérience et les progrès issus des études et des recherches menées sur l'entreposage, notamment celles réalisées dans le cadre de la loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 (17), ouvrent la perspective de conférer une durée de fonctionnement de l'ordre du siècle aux nouvelles installations industrielles d'entreposage[9]. Pour atteindre cette performance, certaines options techniques sont à retenir lors de leur construction (choix des matériaux, épaisseurs d'enrobage des armatures des bétons de structure, conditions thermiques et hydriques à l'intérieur de l'entreposage).

Quelle que soit la durabilité des installations d'entreposage, au terme d'une certaine durée de fonctionnement, même séculaire, les colis de déchets doivent en être retirés et être transférés dans d'autres installations pour assurer à nouveau une protection efficace de l'Homme et de l'environnement.

1.3.3 La dangerosité des déchets HA et MA-VL

1.3.3.1 La dangerosité des déchets HA et MA-VL et les échelles de temps associées

Les déchets HA et MA-VL concentrent plus de 99 % de la radioactivité de l'ensemble des déchets radioactifs dans un volume ne représentant qu'un peu plus de 3 % du volume total (cf. Figure 1-13).

Leur niveau de radioactivité leur confère une forte dangerosité radiologique. Un individu qui se placerait au voisinage immédiat de déchets HA, sans protection, aurait une espérance de vie de quelques minutes du fait de l'intensité de leur rayonnement.

En raison de leurs natures et leurs concentrations nettement plus faibles en radionucléides, les déchets MA-VL sont en général moins irradiants, mais ils restent dangereux. Cela s'illustre bien par l'exemple des colis standards de déchets compactés (CSD-C) produits sur le site d'Orano La Hague. Ces déchets contiennent des structures métalliques issues du traitement des assemblages combustibles (coques issues du cisaillage des gaines et embouts des assemblages cisaillés). Ils figurent parmi les déchets radioactifs MA-VL les plus irradiants. Si une personne était exposée directement au rayonnement émis par un de ces colis de déchets, sans protection, l'irradiation serait environ cent fois moindre qu'en présence d'un colis de déchets HA. Elle provoquerait néanmoins rapidement des lésions et pourrait être létale en cas d'exposition prolongée.

Les déchets HA et MA-VL sont également dangereux dans le cas où des personnes inhaleraient les poussières qui seraient émises à proximité des colis si un accident entraînait une perte de confinement du colis. Une ingestion ou une inhalation de particules de déchets HA et MA-VL pourrait entraîner une contamination interne et une irradiation de l'organisme potentiellement très grave pour la santé. La concentration élevée des actinides dans les déchets HA et MA-VL[10] les rend en effet particulièrement dangereux en cas d'exposition interne. En effet, les actinides, qui sont des émetteurs de particules alpha, ont en cas d'ingestion ou d'inhalation des effets sanitaires potentiellement très graves. Le conditionnement des déchets et notamment leur vitrification a pour effet notable de limiter très fortement l'émission de particules et de poussières (aérosols) en cas d'accident.

En cas de dispersion dans l'environnement, l'ingestion ou l'inhalation de particules ou de poussières émises par les déchets radioactifs HA et MA-VL comporte donc des risques importants. Les phénomènes de dispersion, de dilution, de déposition, d'intégration partielle dans la chaîne alimentaire et de métabolisation tendent toutefois à réduire les risques d'exposition aigüe. Les mécanismes d'estimation des conséquences radiologiques font alors appel à des modèles spécifiques en fonction des voies d'exposition (cf. Volume VI de la présente étude d'impact).

Même si la radioactivité des déchets HA et MA-VL décroit, les échelles de temps associées à leur dangerosité sont très longues. Ce n'est qu'au bout de plusieurs centaines de milliers d'années qu'une grande majorité des radionucléides contenus dans les déchets présentent un impact faible pour l'Homme et l'environnement.

» LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE DES RADIONUCLEIDES DES DECHETS HA ET MA-VL

Les atomes radioactifs (ou radionucléides) sont instables. Ils sont ainsi amenés à se désintégrer et à donner naissance à d'autres atomes, eux-mêmes radioactifs, ou non. C'est la décroissance radioactive.

Les radionucléides sont ainsi caractérisés par la nature du rayonnement qu'ils émettent (plus ou moins énergétique) et par leur période radioactive (ou demi-vie), c'est-à-dire la durée qui est nécessaire pour que la moitié d'une quantité de ce radionucléide se soit désintégrée.

De nombreux radionucléides sont présents dans les colis de déchets HA et MA-VL. Dans les études de sûreté à long terme, on s'intéresse tout particulièrement à 3 d'entre eux (le sélénium 79, l'iode 129 et le chlore 36) car il s'agit des seuls radionucléides susceptibles de migrer et d'atteindre, à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, les formations géologiques sus et sous-jacente.

Ces radionucléides ont une période radioactive très longue :

- 302 000 ans pour le chlore 36 ;
- 280 000 ans pour le sélénium 79 ;
- 15 700 000 ans pour l'iode 129.

1.3.3.2 La spécificité des déchets HA – La production de chaleur

Les études et recherches effectuées en France et dans les autres pays pour la gestion durable des déchets HA et MA-VL tiennent compte de la nature et des propriétés de ces déchets.

Outre un rayonnement externe très important, les colis de déchets HA produisent de la chaleur. En effet, ils contiennent des radionucléides (^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am, ^{244}Cm...) dégageant une quantité significative d'énergie thermique en lien avec leurs désintégrations radioactives.

Au moment de leur production, les colis de déchets HA produisent une quantité de chaleur très importante, de l'ordre de plusieurs milliers de Watt par colis. Cette chaleur est une contrainte de conception importante des installations qui les accueillent.

[9] Les études et recherches sur l'entreposage sont conduites en vue de créer de nouvelles installations d'entreposage ou de modifier les installations existantes, pour répondre aux besoins, notamment en termes de capacité et de durée, recensés par le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. L'Andra a publié en 2013 un « bilan des études et recherches sur l'entreposage des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue » (26).

[10] À titre d'exemple de teneur en actinide mineur dans les déchets, l'américium 241 (^{241}Am) est présent à raison d'environ 10^{14} becquerels par colis de déchets vitrifiés et d'environ 10^{11} becquerels par colis MA-VL de déchets compactés de type CSD-C.

La décroissance radioactive des radionucléides entraîne une diminution forte de cette chaleur sur une durée de l'ordre du siècle, réduisant progressivement les contraintes de conception des installations. Ensuite, la décroissance de la chaleur est plus lente. Ce n'est qu'au-delà du millénaire qu'intervient une nouvelle réduction significative du dégagement de chaleur.

Ainsi, les propriétés des colis de déchets HA, importantes pour les installations qui les accueillent, peuvent se concevoir en deux périodes :

- une première période allant au plus jusqu'à une centaine d'années, caractérisée par une forte dissipation de chaleur, pour laquelle les installations d'entreposage en surface sont particulièrement adaptées (cf. Figure 1-16). En effet, des dispositions classiques de ventilation (ventilation forcée au moyen de ventilateurs ou ventilation naturelle par tirage dans des cheminées) permettent de les refroidir efficacement en utilisant de l'air frais ;
- une seconde période, où les caractéristiques thermiques de ces déchets évoluent peu à l'échelle humaine.

En pratique, pour les colis de déchets HA français, le passage entre ces deux périodes intervient progressivement pendant la durée prévue de leur entreposage. Les colis de déchets HA existants ou à produire passent dans la seconde période avant les années 2150.

Il existe néanmoins certains colis de déchets de HA, dénommés « HA0 » (par opposition aux « HA1 » et « HA2 » plus thermiques), qui produisent moins de chaleur et pour lesquels une telle approche n'est pas justifiée.

Les déchets MA-VL n'évoluent pas non plus significativement en termes de caractéristiques thermiques ou radiologiques dans les entreposages sur une durée séculaire. En matière de gestion des déchets, il n'y a pas de gain substantiel à attendre qui justifierait, sur le plan technique, leur maintien en entreposage sur des durées prolongées.

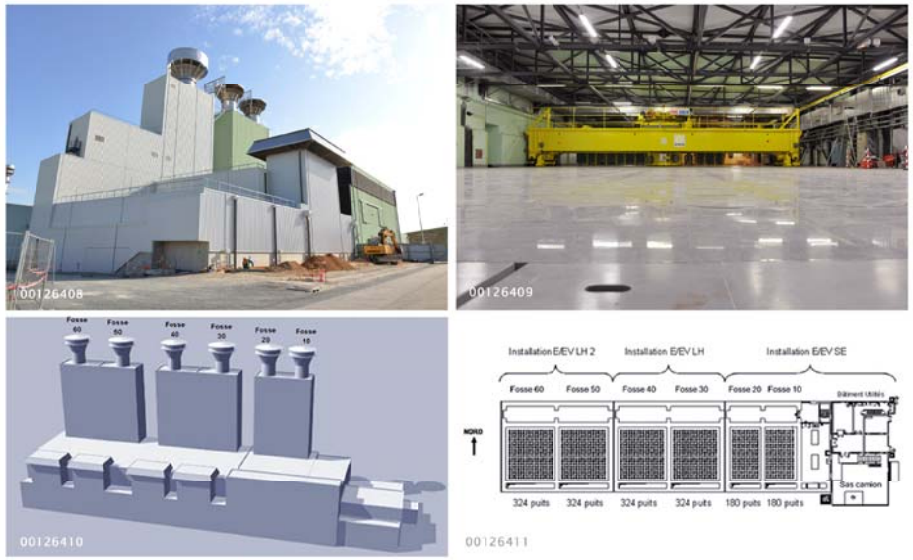


Figure 1-16 Exemple d'installation d'entreposage de déchets HA : installation E-EV-SE du site Orano de La Hague (Source : Orano)

1.3.3.3 Une dangerosité nécessitant une gestion sur le très long terme

La dangerosité des déchets HA et MA-VL nécessite de mettre en place, aux différentes étapes de leur gestion, des dispositifs appropriés à la protection de l'Homme et l'environnement.

Notamment, sur les sites de production, ces déchets sont conditionnés (cf. Chapitre 1.2.3.1 du présent volume et figure 1-8). Leur conditionnement permet ensuite de constituer des « colis de déchets », dans lesquels les déchets radioactifs sont mis sous une forme convenant à leur transport, leur entreposage et leur stockage.

Des dispositifs appropriés à la protection de l'Homme et l'environnement sont également mis en œuvre dans les installations d'entreposage en surface existantes, au sein desquelles les déchets HA et MA-VL déjà produits sont actuellement conservés à titre temporaire (cf. Chapitre 1.3.2 du présent volume). Malgré cette dangerosité intrinsèque des déchets radioactifs, les installations actuelles de gestion des colis de déchets HA et MA-VL, grâce à leur conception très robuste et au regard de leur unique objectif de mise en sécurité de ces déchets, génèrent peu d'exposition du public et de l'environnement en situations normales et dégradées.

Cette étape d'entreposage des déchets HA et MA-VL dans des installations de surface ou sub-surface ne présente pas un caractère pérenne sur le très long terme considérant d'une part, la très longue durée pendant laquelle leur dangerosité perdure (cf. Chapitre 1.3.3.1 du présent volume) et d'autre part, la durée de vie limitée des dites installations d'entreposage, lesquelles nécessitent d'être renouvelées périodiquement pour maintenir leur niveau de sûreté (cf. Chapitre 1.3.2 du présent volume).

Les déchets HA et MA-VL pour lesquels le centre de stockage Cigéo est conçu ne peuvent donc pas être conservés en surface ou à proximité de la surface de façon pérenne et passive (c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire d'intervenir), compte tenu de leur forte dangerosité et de la très longue durée pendant laquelle cette dangerosité perdure.

Cigéo est un projet de centre de stockage en couche géologique profonde, conçu pour protéger durablement l'homme et l'environnement des risques générés par ce type de déchets radioactifs. Il répond à l'objectif d'une gestion durable des déchets les plus dangereux telle que définie dans le code de l'environnement (cf. Article L. 542-1 du code de l'environnement). Il répond plus particulièrement à un double objectif :

- éviter progressivement de mobiliser les générations futures pour gérer ces déchets, grâce au caractère passif des dispositions de protection ;
- protéger durablement l'homme et l'environnement, en isolant les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et en limitant les transferts des radionucléides vers la surface.

Par ailleurs, la mise en stockage des colis de déchets ajoute, au conditionnement de ces derniers, la possibilité d'un confinement passif des déchets radioactifs sur de grandes échelles de temps, adaptées à leurs caractéristiques physico-chimiques.

1.3.4 Les volumes de déchets radioactifs HA et MA-VL à gérer

1.3.4.1 Les notions d'inventaire de référence et d'inventaire de réserve

L'article D. 542-90 du code de l'environnement précise que « *l'inventaire à retenir par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage prévu à l'article L. 542-10-1 comprend un inventaire de référence et un inventaire de réserve. L'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique. Le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence* ». Le code de l'environnement précise en outre que « *s'ils ne figurent pas dans l'inventaire de référence, les combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires, des réacteurs expérimentaux et de la propulsion nucléaire navale sont intégrés dans l'inventaire de réserve* » (article D. 542-91 du code de l'environnement).

Aussi, conformément à ces exigences réglementaires, l'Andra conçoit le centre de stockage Cigéo :

- sur la base de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 1.3.4.2 du présent volume) ;
- pour qu'il puisse évoluer, au fur et à mesure de sa construction, pour s'adapter à d'éventuelles évolutions en matière d'inventaire des déchets stockés, évolutions prises en compte dans l'inventaire de réserve (cf. Chapitre 1.3.4.3 du présent volume). Celles-ci pourraient être liées notamment aux stratégies industrielles ou aux orientations de la politique énergétique française (par exemple un allongement de la durée de vie des réacteurs nucléaires ou au contraire leur arrêt prématuré) ou à la réorientation vers le centre de stockage Cigéo, de déchets justifiant actuellement d'un autre mode de gestion, comme par exemple des déchets de faible activité à vie longue.

Les inventaires de référence et de réserve sont établis sur la base des scénarios de politique énergétique de l'édition 2018 de l'Inventaire national de l'Andra (27). Ces scénarios sont volontairement contrastés pour couvrir le champ des possibles des évolutions de stratégie des industriels et de la politique énergétique de la France au travers de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

Des marges sont prises pour couvrir les incertitudes sur le volume de déchets futurs à produire ou de déchets anciens devant faire l'objet d'opérations de reprise et conditionnement, sur les modalités de conditionnement et sur les caractéristiques de certains déchets.

» LA PRISE EN COMPTE DES PRESCRIPTIONS DU PNGMDR DANS LA DÉFINITION DES SCÉNARIOS DE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE DE L'INVENTAIRE NATIONAL (IN) DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS, BASE DE L'ÉLABORATION DE L'INVENTAIRE POUR LA CONCEPTION DU PROJET DE CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

La « réduction des volumes à la source » ainsi que l'optimisation du choix des filières de gestion des déchets radioactifs sont des principes fondateurs de la gestion des déchets radioactifs en France.

À cet égard, la décision n° 2015-DC-0508 de l'ASN du 21 avril 2015 précise les règles applicables aux installations nucléaires de base pour la gestion des déchets qu'elles produisent (28). L'exploitant d'une INB doit notamment présenter et justifier les dispositions prises pour prévenir et réduire à la source la production et la nocivité des déchets ainsi que les moyens retenus pour réduire par un tri, un traitement et un conditionnement adaptés, la quantité et la dangerosité des déchets à gérer. L'exploitant doit présenter dans le bilan annuel une analyse des déchets produits dans l'installation au cours de l'année civile écoulée. Ce bilan vise à vérifier l'adéquation de la gestion des déchets avec les dispositions prévues par l'étude sur la gestion des déchets et à identifier les axes d'amélioration.

L'article L. 542-1 du code de l'environnement prévoit que les producteurs de déchets radioactifs, dans le cadre de la gestion de leurs déchets avant évacuation vers un exutoire définitif, doivent trier et définir les modes de traitement et de conditionnement des déchets, en fonction des technologies disponibles, dans l'objectif d'en réduire la quantité et la nocivité. À ce titre, les producteurs mettent en œuvre dans leurs installations des dispositions de tri à la source et mènent de nombreuses études relatives au traitement et au conditionnement des déchets. Compte tenu des coûts afférents à la gestion des déchets radioactifs, des mesures visant à réduire leur production à la source sont prises par tous les exploitants. Par ailleurs, les déchets HA et une grande partie des déchets MA-VL sont produits lors du retraitement du combustible nucléaire irradié, opération visant à en séparer l'uranium et le plutonium qui constituent sa part valorisable.

La loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (17) dispose qu' « *après entreposage, les déchets radioactifs ultimes*[11] *ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou à faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ». Elle confie à l'Andra la responsabilité « *de concevoir, d'implanter, de réaliser et d'assurer la gestion (...) des centres de stockage de déchets radioactifs* ».

Les notions d'inventaires de référence et de réserve

Le code de l'environnement prévoit dans son article D. 542-90 que « *l'inventaire à retenir par l'Andra pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage prévu à l'article L. 542-10-1 de ce même code comprend un inventaire de <u>référence</u> et un inventaire de <u>réserve</u>* :

- *l'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique ;*
- *le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence.* »

Les inventaires de référence et de réserve retenus pour les études en phase de conception initiale du centre de stockage Cigéo se fondent sur les inventaires prospectifs de l'édition 2018 de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN) (27). Ces inventaires prospectifs sont évalués sur la base de scénarios contrastés d'évolution de la politique énergétique française à long terme répondant aux prescriptions de l'édition 2016 du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) (15) et prennent en compte les orientations de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2016-2023 (29) fixées dans le décret n° 2016-1442 du 27 octobre 2016 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie (30).

L'inventaire de référence correspond à la production des déchets issus du fonctionnement et du démantèlement des installations autorisées aujourd'hui dans un scénario de poursuite de la production électronucléaire avec une hypothèse de durée de fonctionnement des installations existantes de 50 ans, et de retraitement de la totalité des combustibles usés produits par ces installations dans le parc actuel et dans un parc futur. Cette hypothèse ne préjuge pas de la décision des autorités publiques d'autoriser ou non un allongement de la durée d'exploitation des réacteurs. Les déchets qui seront produits par l'exploitation des installations nucléaires en cours de construction sont également pris en compte (notamment l'EPR de Flamanville, le réacteur expérimental Jules Horowitz, l'installation de recherche ITER).

Conformément au 2° alinéa de l'article D. 542-90 du code de l'environnement susvisé et afin de tenir compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou d'évolutions de la politique énergétique sur la durée de fonctionnement du centre de stockage, l'Andra étudie les adaptations du centre de stockage Cigéo qui seraient nécessaires dans l'éventualité d'un changement de stratégie en matière de politique énergétique afin d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve. Les évolutions de politique énergétique envisageables sont :

- une modification de la durée de fonctionnement des installations nucléaires de base produisant une quantité supérieure de déchets par rapport à celle prise en compte pour la conception du centre de stockage Cigéo ;
- le déploiement de nouveaux parcs de réacteurs électronucléaires permettant ou non de recycler l'ensemble des matières produites par le parc actuel ;
- le choix de ne pas retraiter certains combustibles usés, impliquant ainsi leur requalification en déchets ;
- la décision d'arrêter globalement le retraitement-recyclage des combustibles usés par exemple en cas de décision de ne pas renouveler la production électronucléaire se traduisant par une requalification de tout ou partie des matières impliquées en déchets.

[11] L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement qualifie de déchets radioactifs ultimes les déchets radioactifs « qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux ».

Ainsi ces incertitudes d'évolution sont prises en compte dans l'inventaire de réserve *via* deux scénarios :

- l'intégration dans l'inventaire de réserve de déchets qui résulteraient d'un allongement de la durée de fonctionnement d'environ dix ans des réacteurs électronucléaires existants par rapport à celle de 50 ans prise en compte pour établir l'inventaire de référence ;
- l'intégration dans l'inventaire de réserve de la totalité des combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires qui n'auraient pas fait l'objet, selon le calendrier d'arrêt des réacteurs découlant des scénarios de l'Inventaire national[12], d'un retraitement dans les installations actuelles prévues à cet effet, des réacteurs expérimentaux et les combustibles usés de la propulsion nucléaire navale.

Une autre incertitude concerne la mise en place d'une installation de stockage capable de prendre en charge tout ou partie des déchets aujourd'hui affectés au stockage de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). À ce titre, l'inventaire de réserve retenu pour le centre de stockage de Cigéo comprend les déchets FA-VL suivants : les chemises et empilements de graphite, les déchets dits « UNGG de La Hague », certaines familles de colis de déchets bitumés (relevant de la catégorie FA-VL) et les déchets de petits producteurs (sources, paratonnerres et déchets de la Défense nationale). L'Andra joint à son dossier de demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo des résultats des études préliminaires de prise en compte de l'inventaire de réserve afin de vérifier que la conception du centre de stockage retenue pour l'inventaire de référence n'est pas rédhibitoire à un éventuel changement de décision. Les résultats de ces études préliminaires seront synthétisés en particulier dans la « Pièce 8 - Étude de maitrise des risques[13] » du dossier support à la demande de création de l'INB (2).

Les mises à jour périodiques du « Plan directeur de l'exploitation » (31), en concertation avec les parties prenantes et le public, permettent d'adapter le déroulement de référence du projet aux éventuelles évolutions du besoin. Si, au cours de l'exploitation du centre de stockage Cigéo, une décision était prise d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve, un dossier de demande d'autorisation spécifique serait déposé par l'Andra, sur la base en particulier des résultats de la conception détaillée du stockage faisant l'objet de la demande et la démonstration de sûreté associée ainsi que des résultats de l'étude d'impact environnementale.

En matière de gestion globale des déchets, la récupérabilité (c'est-à-dire la capacité à retirer des colis de déchets stockés dans le centre de stockage Cigéo) permettrait aux générations futures de retirer tout ou partie des colis de déchets stockés dans le centre de stockage Cigéo, jusqu'à sa fermeture définitive, si une utilisation ou une autre voie de gestion, encore non-envisagée à ce jour, venait à émerger dans le futur et à se matérialiser en une filière industrielle de gestion.

1.3.4.2 L'inventaire de référence retenu pour la conception du centre de stockage Cigéo

La conception du centre de stockage Cigéo repose sur les déchets de l'inventaire de référence.

L'inventaire de référence est également utilisé comme socle à sa démonstration de sûreté (cf. Chapitre 2.5.2 du présent volume) et à l'évaluation de ses impacts radiologiques (cf. Volume IV de la présente étude d'impact).

Cet inventaire de référence prend en compte :

- les déchets déjà produits et entreposés, en attente d'une filière de gestion durable, dans les bâtiments d'entreposage des producteurs de déchets (environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL) ;
- les déchets qui seront produits à l'avenir par les installations nucléaires existantes et par celles dont la création a été autorisée à fin 2016, jusqu'au terme prévisible de leur fonctionnement, puis de leur démantèlement.

Les hypothèses prises en comptes correspondent à un scénario de production électronucléaire considérant une durée de fonctionnement uniforme des centrales nucléaires actuelles de 50 ans ainsi que le retraitement de la totalité des combustibles usés produits par ces installations. Cette hypothèse ne préjuge pas de la décision des autorités publiques d'autoriser ou non un allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs, de l'éventuelle création d'un nouveau parc ou d'éventuelles évolutions de stratégie en matière de retraitement. Les déchets qui seront produits par l'exploitation des installations nucléaires en cours de construction sont également pris en compte, notamment l'EPR de Flamanville (Manche), le réacteur expérimental Jules Horowitz et l'installation de recherche ITER tous deux implantés à Cadarache (Bouches-du-Rhône).

Le Conseil d'administration de l'Andra a proposé dans sa délibération du 5 mai 2014 (32) relative aux suites à donner au débat public sur le projet global Cigéo que *« le périmètre des déchets à retenir par l'Andra pour élaborer la demande d'autorisation de création de Cigéo soit fixé par l'État, notamment pour assurer l'articulation entre l'inventaire des déchets de Cigéo et les scenarios de politique énergétique »*.

Cet inventaire de référence constitue l'inventaire actuellement retenu pour la conception du centre de stockage Cigéo . Il ne préjuge pas des déchets qui seront autorisés à être stockés *in fine* dans le centre de stockage Cigéo. Toute évolution notable de cet inventaire au-delà devra faire l'objet d'un nouveau processus d'autorisation.

Les différents déchets destinés au centre de stockage Cigéo sont présentés dans le volume 3 de la « Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté » de la demande d'autorisation de création (DAC) de l'INB Cigéo (14).

L'inventaire de référence ne comprend pas les combustibles usés des réacteurs électronucléaires, En effet, aujourd'hui la politique de la France en matière de cycle du combustible prévoit le recyclage des combustibles usés pour permettre la réutilisation des matières valorisables qu'ils contiennent. Ce sont donc des matières, destinées non pas à être stockées mais à être retraitées : autrement dit, ce qui est pris en considération dans l'inventaire de référence, ce sont les déchets HA et MA-VL issus du processus de retraitement et non les combustibles eux-mêmes.

Le volume de colis de déchets radioactifs concerné par l'inventaire de référence, destiné à être stocké dans Cigéo si le centre de stockage est autorisé, est de l'ordre de 83 000 m³ (cf. Figure 1-17). Il correspond à environ 225 000 colis stockés.

Dans son avis du 1er décembre 2020 (16), l'ASN estime que *« le programme industriel de gestion des déchets proposé par l'Andra et les producteurs pour l'exploitation du projet de stockage Cigéo couvre bien l'ensemble des familles de déchets inscrites dans l'inventaire de référence de Cigéo »*.

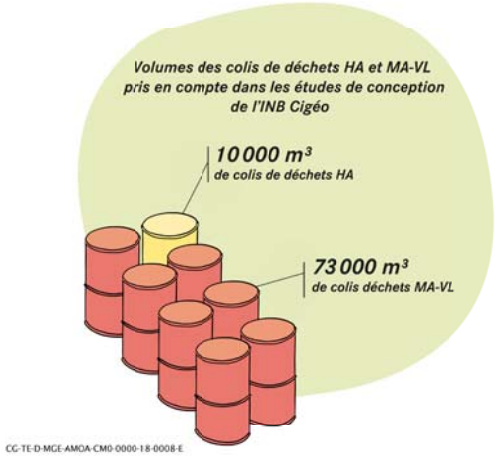


Figure 1-17 *Volumes des colis de déchets HA et MA-VL pris en compte dans les études de conception de l'INB Cigéo*

Le tableau 1-2 et le tableau 1-3 suivants fournissent les volumes[14] de colis primaires de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence (selon l'Inventaire national à fin 2020).

[12] https://inventaire.andra.fr/
[13] Selon l'article R. 593-16, l'étude de maitrise des risques comprendra une présentation des dispositions prévues pour assurer le caractère réversible (dont l'adaptabilité) du stockage ainsi que le prescrit l'article L. 542-10-1.

[14] Les volumes indiqués correspondent au volume d'eau qui serait déplacé par immersion des colis primaires.

Tableau 1-2 Volume des colis primaires de déchets HA destinés au centre de stockage Cigéo

	Inventaire de référence de Cigéo	Volume déjà produit au 31/12/2020 (selon Inventaire national)
Déchets vitrifiés	9 900 m³	4 110 m³
Autres déchets HA (sources scellées usagées, déchets technologiques...)	100 m³	50 m³
TOTAL	≈ 10 000 m³	4 160 m³

Tableau 1-3 Volume des colis primaires de déchets MA-VL destinés au centre de stockage Cigéo

	Inventaire de référence de Cigéo	Volume déjà produit au 31/12/2020 (selon Inventaire national)
Déchets de structure de combustibles usés[15]	13 870 m³	6 748 m³
Déchets issus du fonctionnement et du démantèlement	59 130 m³	35 032 m³
TOTAL	≈ 73 000 m³	41 780 m³

Le planning prévisionnel de livraison des colis de l'inventaire de référence est étudié en concertation avec les producteurs, en cohérence avec le déploiement des installations du centre de stockage Cigéo. Il prend en compte les contraintes liées à la gestion des entreposages des producteurs et les contraintes liées au transport depuis les sites expéditeurs. Sur la base des hypothèses retenues à ce stade, les colis qui pourraient être stockés les premières années, sont :

- des colis MA-VL livrés depuis le site Orano de La Hague ;
- des colis HA présentant un dégagement de chaleur modéré livrés également depuis le site de la Hague (cf. Chapitre 1.2.4 du présent volume).

» CAS SPÉCIFIQUE DES DÉCHETS EN PROVENANCE DE LA PRINCIPAUTÉ DE MONACO

Le stockage, en France, de déchets radioactifs en provenance de l'étranger ainsi que celui des déchets radioactifs issus du traitement de combustibles usés et de déchets radioactifs provenant de l'étranger sont interdits conformément à l'article L. 542-2 du code de l'environnement. La réalisation du centre de stockage Cigéo ne modifie en rien cette interdiction.

Comme le prévoit l'article L. 542-2 III, par exception, le stockage des déchets radioactifs produits dans la principauté de Monaco est autorisé en France dans les conditions définies par l'accord du 9 novembre 2010 signé entre le gouvernement de la République française et le gouvernement de la principauté de Monaco relatif à la prise en charge sur le territoire français de déchets radioactifs monégasques. Les déchets radioactifs de la Principauté de Monaco, proviennent d'activités médicales ou de recherche. En effet, compte tenu de l'exiguïté particulière de son territoire, de plus, enclavé dans le territoire français, Monaco n'est pas en mesure de se doter d'un centre de stockage satisfaisant sur le plan des normes de sécurité et de sûreté. C'est pourquoi l'Andra assure la gestion de ces déchets qui représentent une infime partie du volume total qu'elle prend en charge et qui sont destinés aux centres de stockage en surface.

Dans tous les cas, la France peut refuser la prise en charge de ces déchets produits aux conditions qu'elle définit puisque toute prise en charge de déchets radioactifs monégasques est soumise au préalable à une autorisation des autorités françaises et doit respecter les spécifications définies par l'Andra.

1.3.4.3 L'inventaire de réserve et l'adaptabilité du centre de stockage Cigéo

Pour tenir compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou d'évolutions de la politique énergétique, l'Andra étudie les mesures conservatoires et les adaptations du centre de stockage Cigéo qui seraient nécessaires dans l'éventualité d'une décision d'y stocker les déchets de l'inventaire de réserve.

Le PNGMDR 2016-2018 (15) imposait à l'Andra de remettre « avant *le 31 mars 2017 au ministre chargé de l'énergie une proposition de types et de quantités de déchets à inclure dans les réserves* ». L'Andra a remis cette proposition en 2017 (33), proposition mise à jour afin de prendre en compte les scénarios prospectifs de production électronucléaire de l'édition 2018 de l'Inventaire national et remise en 2019 (27). Les différents scénarios pris en compte dans l'inventaire de réserve sont présentés ci-dessous, ainsi qu'une estimation du volume que cela représenterait (comprenant les déchets et leur conditionnement ainsi que le conteneur de stockage) :

1. Dans le cadre d'un scénario de poursuite du nucléaire, avec retraitement des combustibles usés : l'allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs de 50 à 60 ans, qui induirait le stockage d'environ 4 000 m³ de déchets supplémentaires conditionnés en conteneurs de stockage (dont 3 700 m³ de déchets vitrifiés HA) ;
2. Un scénario d'arrêt du nucléaire après 60 ans de fonctionnement des REP du parc actuel, impliquant l'arrêt du retraitement, qui conduirait au stockage de près de 53 000 m³ de colis de stockage contenant les éléments combustibles EDF. Ce scénario s'accompagne d'une diminution de 3 400 m³ de l'inventaire en déchets vitrifiés HA de l'inventaire de référence et de 4 300 m³ de l'inventaire des déchets MA-VL issus du retraitement ;
3. Le stockage des éléments combustibles du CEA qui conduirait à un volume en stockage d'environ 300 m³. Les variations à la baisse des volumes de déchets HA et MA-VL retenus dans l'inventaire de référence issus du retraitement sont minimes ;
4. Le stockage d'une partie des déchets FA-VL compte tenu d'incertitudes concernant la mise en place d'une installation de stockage capable de prendre en charge tous les déchets FA-VL, et dans des délais compatibles avec les besoins d'évacuation des producteurs de ces déchets. Cela conduirait à un volume en stockage de plus de 160 000 m³.

Note : le point 1 ne peut pas être cumulé avec le point 2. En effet, soit, dans le cadre d'un scénario de poursuite de la production électronucléaire, la durée de fonctionnement des réacteurs est allongée (point 1), soit on évalue les natures et quantité de déchets à stocker dans le cadre d'un scenario d'arrêt de la production électronucléaire avec arrêt du retraitement (point 2).

L'inventaire de réserve retenu par l'Andra en lien avec les producteurs de déchets intègre (34) :

- les déchets HA et MA-VL qui résulteraient d'un éventuel allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs et installations existantes pour une durée comprise entre 50 et 60 ans selon les réacteurs[16], au lieu d'une durée uniforme de 50 ans retenue pour l'inventaire de référence :
  - ✓ le retraitement des combustibles utilisés pendant ces années de fonctionnement supplémentaires des réacteurs induit la production de 10 000 colis HA supplémentaires[17], par rapport au scénario de référence, représentant une augmentation de 17 % du nombre de colis HA ;
  - ✓ le fonctionnement des réacteurs induit la production de 120 colis MA-VL supplémentaires (déchets activés), ce qui représente une augmentation de 0,1 % du nombre de colis MA-VL ;

[15] Les déchets de structure sont constitués des pièces métalliques des assemblages combustibles, séparées lors du traitement.
[16] Scénario cohérent avec celui défini dans l'édition 2018 de l'Inventaire national de l'Andra (27).
[17] Déchets HA vitrifiés et déchets MA-VL de structure compactés et.

- les combustibles usés des réacteurs expérimentaux et les combustibles usés de la propulsion nucléaire navale :
  - ✓ 4 300 éléments combustibles ;
- les combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires qui n'auraient pas fait l'objet d'un retraitement dans les installations actuelles prévues à cet effet ; Les quantités maximales retenues sont celles évaluées sur la base d'un scénario de non-renouvellement de la production électronucléaire :
  - ✓ l'inventaire de réserve comporte à ce titre 60 000 éléments combustibles. Cet inventaire se répartit entre les éléments combustibles de type UNE, MOX, URE et les éléments combustibles de réacteurs à neutrons rapides neufs ou usés ;
- une partie des déchets destinés à la filière FA-VL tels que déclarés pour l'édition 2018 de l'Inventaire national (27) :
  - ✓ les colis de déchets bitumés relevant de la filière FA-VL (32 901 colis pour un volume de 12 733 m³) ;
  - ✓ les chemises[18] et empilements[19] en graphite (143 000 colis pour un volume de 92 935 m³) ;
  - ✓ les déchets dits « UNGG de La Hague » (3 014 colis pour un volume de 3 962 m³) ;
- les déchets particuliers de « petits » producteurs et du « nucléaire diffus »[20] (42 colis pour un volume de 37 m³).

Dans son avis du 1er décembre 2020 (16), l'ASN estime « *satisfaisant que la mise à jour de l'inventaire de réserve, proposée par l'Andra, intègre désormais l'ensemble des combustibles usés du CEA (civils et défense), des déchets des petits producteurs et du nucléaire diffus et des empilements de graphite* ».

L'ensemble des substances figurant dans l'inventaire de réserve doit pouvoir être stocké en toute sûreté par l'introduction d'évolutions de conception pouvant être mises en œuvre, à un coût économiquement acceptable, au cours du fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Afin de garantir cette possibilité, l'Andra mène des études dites « d'adaptabilité » du centre de stockage Cigéo, en parallèle de la conception visant au stockage de l'inventaire de référence. Ces études d'adaptabilité sont intégrées au dossier support à la demande d'autorisation de création de l'INB Cigéo.

Si, au cours de l'exploitation du centre de stockage Cigéo, une décision était prise d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve, une demande d'autorisation spécifique serait déposée par l'Andra. La réception des déchets de l'inventaire de réserve et la mise en œuvre des évolutions de conception feront l'objet, le moment venu, des procédures d'autorisation adéquates selon le cadre réglementaire en vigueur.

En particulier l'accueil de combustibles usés nécessitera une nouvelle demande d'autorisation, sachant que l'éventuelle nécessité de stocker les combustibles usés ne relève pas d'une décision de l'Andra mais d'un possible changement de la politique énergétique de la France (réutilisation des matières valorisables contenues dans les combustibles qui pourrait être remise en question). Au stade de la demande d'autorisation de création (DAC), et conformément aux demandes de l'ASN, l'Andra doit justifier, au travers d'études dites « d'adaptabilité » qu'il n'y aurait pas d'éléments rédhibitoires au stockage éventuel de ces combustibles. Il s'agit de vérifier que la démonstration de sûreté pourrait être apportée pour leur stockage si celui-ci était décidé, ce qui supposerait donc à la fois un changement de la politique énergétique nationale et la décision par les générations futures de retenir le centre de stockage Cigéo comme solution de stockage pour ces combustibles usés. En conséquence, le choix de l'inventaire à stocker dans le centre de stockage Cigéo, et notamment la question de l'intégration ou non dans cet inventaire des combustibles usés, ne relève pas d'une approche consistant à définir la solution de stockage la plus adaptée et qui nécessiterait une analyse comparée des scénarios. En effet, les combustibles ne sont pas, à ce jour, des déchets. Une analyse telle que préconisée par l'Autorité environnementale serait effectivement à mener en cas de reclassement en « déchets » des combustibles suite à un éventuel abandon du retraitement, afin de définir la solution optimale de gestion de ceux-ci. Une telle démarche relèverait d'un choix de gestion de la filière des déchets HA/MA-VL et relèverait du PNGMDR[21].

Les études d'adaptabilité permettent ainsi de vérifier que la conception actuelle de l'INB de Cigéo ne présente pas de caractère rédhibitoire au stockage des colis de l'inventaire de réserve. Ces résultats d'études offrent donc des choix de gestion aux générations successives, mais ils ne modifient, ni les voies de gestion actuellement retenues pour ces déchets, ni les études pour le développement de filières qui leur seraient plus spécifiquement adaptées qui sont organisées par le plan national de gestion des matières et des déchet radioactifs (PNGMDR).

1.3.4.4 Les déchets d'éventuelles futures installations nucléaires

Le déploiement de nouvelles capacités de production nucléaire dépend de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui est l'outil de pilotage de la politique énergétique française. La PPE est liée à d'autres plans nationaux, la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR). Ce dernier définit et évalue les modes de gestion des déchets radioactifs produits par les installations nucléaires. Ces trois documents-cadres sont établis par le ministère de la Transition écologique et font l'objet de séquences de concertation avec le public, conformément à l'article R. 121-1-1 du code de l'environnement. Ainsi, le projet de PPE 2019-2028 a fait l'objet d'un débat public en 2018 (36). C'est ce projet qui a été pris en compte pour le dimensionnement du futur centre de stockage Cigéo.

Sur la durée prévisionnelle séculaire de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, la création de nouvelles installations nucléaires produisant des déchets radioactifs, ou consacrées à leur gestion, est une hypothèse suffisamment probable pour devoir être envisagée. Les inventaires des déchets HA et MA-VL sont fondés sur des hypothèses prévisionnelles évolutives de production de déchets et ne doivent pas être considérés comme des données intangibles. Toute évolution de l'inventaire des déchets du centre de stockage Cigéo serait instruite, pour le compte du Gouvernement, dans le cadre de futurs travaux du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) (cf. Chapitre 1.3.2 du présent document).

En 2022, le Gouvernement a publié des travaux menés dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) exposant ses réflexions quant aux conditions techniques et économiques d'une décision de construction de nouveaux réacteurs nucléaires. Ces travaux intègrent une analyse des conséquences d'un renouvellement du parc sur le cycle du combustible et la gestion des déchets nucléaires.

En appui de cette analyse, le Gouvernement a sollicité l'Andra pour réaliser une première évaluation technique de l'éventuel impact sur le centre de stockage Cigéo.

Cette évaluation préliminaire par l'Andra se fonde sur les hypothèses du rapport du Gouvernement et les travaux menés par ailleurs dans le cadre de l'adaptabilité du centre de stockage. Elle ne préjuge pas des processus règlementaires et démocratiques requis pour la création de nouveaux réacteurs et pour la gestion des déchets induits.

Le déploiement progressif du centre de stockage Cigéo lui confère une capacité à s'adapter à des évolutions d'inventaire. Si la création de nouveaux réacteurs était autorisée, des études techniques d'esquisse, puis d'avant-projet devraient être engagées par l'Andra, sur la base de données techniques affinées, afin de pouvoir déposer auprès des autorités compétentes les dossiers réglementaires nécessaires à l'obtention des autorisations de mise en stockage des déchets induits.

Dans le cadre de l'hypothèse, faite par le Gouvernement, de la construction, puis de l'exploitation de 6 nouveaux réacteurs nucléaires de type EPR2, et à stratégies de gestion des combustibles usés équivalentes à celles étudiées pour le parc actuel, les déchets HA et MA-VL produits présenteraient des caractéristiques similaires à ceux étudiés pour la conception du centre de stockage Cigéo.

Au stade de l'analyse préliminaire menée par l'Andra, la sûreté du centre de stockage Cigéo et sa faisabilité ne sont pas remises en cause par le stockage des déchets qui seraient produits par ces six nouveaux réacteurs.

La production et l'expédition des déchets supplémentaires produits par ces 6 nouveaux réacteurs EPR2, ainsi que la décroissance de la puissance résiduelle des déchets HA afférents, nécessaire avant leur mise en stockage, conduiraient à un allongement de la durée de fonctionnement du centre de stockage Cigéo. En lien avec ces délais

[18] Les chemises en graphite sont les enveloppes cylindriques creuses qui entouraient le combustible dans les réacteurs de la filière uranium naturel graphite gaz (UNGG).

[19] Les empilements en graphite accueillaient les chemises et constituaient des éléments du cœur des réacteurs de la filière uranium naturel graphite gaz (UNGG).

[20] Selon l'arrêté du 23 avril 2012 pris en application du décret n° 2012-542 du 23 avril 2012 pris pour l'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, les déchets radioactifs du nucléaire « diffus » sont les déchets radioactifs produits ponctuellement et en quantités limitées hors des installations nucléaires de base et des installations nucléaires de base secrètes (35).

[21] Il convient en effet de ne pas confondre l'évaluation environnementale du centre de stockage Cigéo conçu dans le cadre de la politique énergétique et la politique en matière de cycle du combustible, qui sont une donnée d'entrée pour l'Andra, et l'évaluation environnementale du cycle du combustible, qui dépasse l'Andra, et qui relèverait d'une évaluation environnementale plus large, centrée sur les usines du cycle

de production et d'expédition des déchets produits par ces nouveaux réacteurs, des études complémentaires pourront ainsi être menées.

Les études d'adaptabilité permettent ainsi de vérifier que la conception actuelle de l'INB Cigéo ne présente pas de caractère rédhibitoire au stockage des colis de l'inventaire de réserve. Ces résultats d'études offrent donc des choix pour de futures décisions en matière de gestion de ces déchets, mais ne modifient, ni leurs voies de gestion retenues actuellement, ni les études pour le développement de filières qui leur seraient plus spécifiquement adaptées. Celles-ci qui sont organisées par le Plan national de gestion des matières et des déchet radioactifs (PNGMDR).

En outre, sur la durée prévisionnelle séculaire de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, la création de nouvelles installations nucléaires produisant des déchets radioactifs, ou consacrées à leur gestion, est une hypothèse suffisamment probable pour devoir être envisagée. Les inventaires des déchets HA et MA-VL sont fondés sur des hypothèses prévisionnelles évolutives de production de déchets et ne doivent pas être considérés comme des données intangibles. Toute évolution de l'inventaire des déchets du centre de stockage Cigéo serait instruite, pour le compte du gouvernement, dans le cadre de futurs travaux du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR).

Synthèse - Les déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Les déchets HA sont essentiellement des résidus extraits des combustibles nucléaires lors de leur retraitement (produits de fission et actinides mineurs), puis vitrifiés. Les déchets MA-VL sont principalement des pièces métalliques issues du retraitement des assemblages de combustibles nucléaires, des composants ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires, des déchets issus du fonctionnement des installations nucléaires (déchets de maintenance, résidus des procédés...) et de leur démantèlement.

La dangerosité des déchets radioactifs HA et MA-VL nécessite de mettre en place, aux différentes étapes de leur gestion, des dispositifs appropriés à la protection de l'Homme et l'environnement.

Ils font en premier lieu l'objet d'un conditionnement. Ce conditionnement représente l'ensemble des opérations consistant à introduire des déchets dans un conteneur[22], où ils sont incorporés, ou non, dans un matériau dit « d'enrobage ». Les opérations de conditionnement comprennent par exemple le compactage, la vitrification, la cimentation, le bitumage, la mise en conteneur. Elles permettent de constituer des « colis de déchets », dans lesquels les déchets radioactifs sont mis sous une forme convenant à leur transport, leur entreposage ou leur stockage

Par ailleurs, des dispositifs appropriés à la protection de la santé de l'homme et de l'environnement sont également mis en œuvre dans les installations d'entreposage au sein desquelles les déchets HA et MA-VL déjà produits sont actuellement conservés à titre temporaire (installations d'entreposage robustes avec parois épaisses, barrières de confinement...). Malgré cette dangerosité intrinsèque des déchets radioactifs, les installations actuelles de gestion des colis de déchets HA et MA-VL, grâce à leur conception robuste et au regard de leur unique objectif de mise en sécurité de ces déchets, génèrent peu d'exposition du public et de l'environnement en situations normales et dégradées.

Toutefois, cette étape d'entreposage des déchets HA et MA-VL dans des installations de surface ou sub-surface ne présente pas un caractère pérenne sur le très long terme considérant d'une part, leur niveau de radioactivité et la très longue durée pendant laquelle leur dangerosité perdure et d'autre part, la durée de vie limitée des dites installations d'entreposage, lesquelles nécessitent d'être renouvelées périodiquement pour maintenir leur niveau de sûreté.

En revanche, le projet global Cigéo permet d'assurer une mise en sécurité passive définitive, et sur le très long terme, des colis de déchets HA et MA-VL actuellement entreposés chez les producteurs en attente d'une gestion durable. La mise en stockage des colis de déchets ajoute, au conditionnement de ces derniers, la possibilité d'un confinement passif des déchets radioactifs sur de grandes échelles de temps, adaptées à leurs caractéristiques physico-chimiques.

La conception du centre de stockage Cigéo repose sur les déchets d'un inventaire de référence. Cet inventaire de référence est constitué de l'inventaire des déchets HA et MA-VL déjà produits (environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL) et de ceux qui seront produits à l'avenir par les installations nucléaires existantes et par celles dont la création a été autorisée à fin 2016, jusqu'au terme prévisible de leur fonctionnement, puis de leur démantèlement. Le volume des colis de déchets radioactifs de l'inventaire de référence destiné à être stocké dans le centre de stockage Cigéo si le centre de stockage est autorisé, est de l'ordre de 83 000 m³ (environ 10 000 m³ pour les colis de déchets HA et environ 73 000 m³ pour les colis de déchets MA-VL). Il correspond à environ 225 000 colis stockés.

Le planning prévisionnel de livraison est étudié en concertation avec les producteurs de déchets. Les colis qui pourraient être stockés les premières années sont des colis MA-VL et des colis HA présentant un dégagement de chaleur modéré.

Pour tenir compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou d'évolutions de la politique énergétique, l'Andra étudie les adaptations du centre de stockage Cigéo qui seraient nécessaires si l'inventaire des déchets à stocker venait à être modifié. Ces évolutions sont étudiées au travers d'un inventaire de réserve composé d'une partie des déchets aujourd'hui orientés vers la filière FA-VL, des combustibles expérimentaux et de la propulsion nucléaire navale et des combustibles usés des réacteurs électronucléaires qui ne seraient pas retraités dans un scénario de politique énergétique consistant à arrêter la production d'électricité d'origine nucléaire.

[22] Une étape de préparation des déchets peut éventuellement précéder la mise en conteneur (préconditionnement).

1.4 Le contexte de la gestion durable des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Selon le code de l'environnement, la gestion durable des déchets radioactifs a pour objectif leur mise en sécurité définitive pour prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations futures (article L. 542-1 du code de l'environnement). En effet, ce sont les générations actuelles qui ont exercé les activités nucléaires et qui en ont bénéficié (cf. Chapitre 1.1.2 du présent volume). Il est donc de leur responsabilité de déployer les options techniques permettant d'assurer la gestion pérenne et sûre des déchets HA et MA-VL produits, sans en reporter indéfiniment la charge de générations en générations. L'exposé des motifs de la loi votée en 2016 pour préciser les modalités de création d'un stockage géologique (37, 38), portée au Parlement par des élus d'engagements politiques différents, évoque la volonté d'élus « *qui ont en commun de ne pas laisser aux générations à venir, sans solution face à une situation dont nous avons bénéficié et dont nous bénéficierons encore plusieurs décennies* » et le refus de « *l'égoïsme générationnel qui consisterait à laisser aux générations nouvelles le soin d'assumer seules les contreparties de nos avantages accumulées pendant la période de production de nos réacteurs* ».

Aujourd'hui, des financements, des ressources humaines, des compétences et des moyens techniques sont disponibles pour engager des décisions visant à mettre définitivement en sécurité les déchets HA et MA-VL. Ces connaissances et ces moyens financiers et techniques sont accessibles en raison de l'existence de l'industrie électronucléaire actuelle, adossée à un important secteur de recherches nucléaires. Ces moyens ont été développés et encadrés par des politiques nationales sur plusieurs décennies.

Compte tenu des déchets HA et MA-VL déjà produits[23], la question de leur gestion durable est indépendante du fait que leur production perdure ou cesse à l'avenir. Elle doit être bien distinguée des décisions concernant l'avenir des programmes militaires ou de la filière électronucléaire.

» LE FINANCEMENT DE LA GESTION DURABLE DES DÉCHETS HA ET MA-VL

La loi du 28 juin 2006 (17) prévoit un cadre pour le financement de la gestion durable des déchets HA et MA-VL avec la création de plusieurs fonds spécifiques destinés à financer les études et les recherches, les études de conception et travaux préalables, ainsi que la construction, le fonctionnement, le démantèlement et la fermeture d'un centre de stockage en couche géologique profonde adapté à ces types de déchets.

L'ensemble de ces dépenses est financé intégralement par les producteurs de déchets, conformément au principe « pollueur-payeur » (article L. 110-1 II 3° du code de l'environnement) et de l'article L. 542-1 du code de l'environnement.

Les principes de financement fixés par les articles L. 542-12-2 et L. 542-12-3 du code de l'environnement instituent respectivement au sein de l'Andra :

- un fonds destiné au financement de la construction, de l'exploitation, de la fermeture, de l'entretien et de la surveillance des installations d'entreposage ou de stockage des déchets de haute activité ou des déchets de moyenne activité à vie longue construites ou exploitées par l'Andra. Ce fonds aura pour ressources les contributions des exploitants d'installations nucléaires de base définies par des conventions ;
- un fonds destiné à financer les études nécessaires à la conception des installations de stockage des déchets radioactifs de haute activité et des déchets de moyenne activité à vie longue construites par l'Andra, ainsi que les opérations et travaux préalables au démarrage de la phase de construction de ces installations. Ce fonds a pour ressources le produit de la contribution spéciale prévue au I de l'article 58 de la loi n° 2013-1279 du 29 décembre 2013 de finances rectificative pour 2013 (39).

Les études et recherches bénéficient également d'un financement par fonds créé à l'article L. 542-12-1 du code de l'environnement, fonds destiné au financement des recherches et études sur l'entreposage et le stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs. Ce fonds a pour ressources le produit de la taxe dite de "recherche" additionnelle à la taxe sur les installations nucléaires de base prévue au V de l'article 43 de la loi de finances pour 2000 (loi n° 99-1172 du 30 décembre 1999 (40)). Ce fonds finance notamment les études de recherches et développement de l'Andra et les coûts de fonctionnement du Laboratoire de recherche souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitres 2.3.1 et 2.3.2.1 du présent volume).

En complément de ces fonds, un dispositif de sécurisation de la disponibilité des financements auprès des producteurs de déchets a été instauré par la loi du 28 juin 2006 (17). Les articles L. 594-1 et L. 594-2 du code de l'environnement prévoient notamment que :

- les exploitants d'installations nucléaires de base évaluent les charges de gestion de leurs combustibles usés et déchets radioactifs ;
- ils constituent les provisions correspondant à ces charges et affectent, à titre exclusif, à la couverture de ces provisions les actifs nécessaires ;
- ils comptabilisent de façon distincte ces actifs qui doivent présenter un degré de sécurité et de liquidité suffisant pour répondre à leur objet. Leur valeur de réalisation doit être au moins égale au montant des provisions, à l'exclusion de celles liées au cycle d'exploitation.

En application de l'article L. 594-4 du code de l'environnement, un dispositif de contrôle a été mis en place. Les exploitants transmettent tous les trois ans à l'autorité administrative compétente un rapport décrivant l'évaluation des charges, les méthodes appliquées pour le calcul des provisions afférentes à ces charges et les choix retenus en ce qui concerne la composition et la gestion des actifs affectés à la couverture des provisions. Ils transmettent tous les ans à l'autorité administrative compétente une note d'actualisation de ce rapport et l'informent sans délai de tout événement de nature à en modifier le contenu.

Synthèse - Le contexte de la gestion durable des déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

La gestion durable des déchets HA et MA-VL, c'est-à-dire leur mise en sécurité définitive et sur le très long terme, pour prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations futures, est une exigence éthique fixée par le code de l'environnement.

En effet, il est de la responsabilité des générations actuelles, qui ont exercé les activités nucléaires et qui en ont bénéficié, de déployer les options techniques permettant d'assurer la gestion pérenne et sûre des déchets HA et MA-VL produits, sans en reporter indéfiniment la charge de générations en générations.

Le projet global Cigéo permet d'assurer cette gestion durable des déchets HA et MA-VL.

[23] Des colis de déchets sont produits depuis le début des années soixante.

2

Les solutions de substitution examinées et la justification des principales raisons techniques et environnementales des choix effectués

2.1 Les exigences de protection pour la santé de l'homme et de l'environnement à prendre en compte 28

2.2 Le choix du stockage géologique parmi les différentes pistes de gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL 29

2.3 Le choix français du stockage des déchets radioactifs HA et MA-VL dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien 58

2.4 Les choix d'implantation du centre de stockage Cigéo et des autres opérations associées 74

2.5 Les principaux choix techniques et environnementaux effectués pour la conception du centre de stockage Cigéo 108

2.6 Un projet développé en dialogue avec la société 136

2.7 Pourquoi engager la réalisation du centre de stockage Cigéo maintenant ? 146

2.1 Les exigences de protection pour la santé de l'homme et de l'environnement à prendre en compte

Les études et recherches effectuées en France et dans les autres pays pour la gestion durable des déchets HA et MA-VL, sur le très long terme, tiennent compte de la nature et des propriétés de ces déchets (cf. Chapitre 1.3 du présent volume) ainsi que des objectifs et exigences présentées ci-après.

Toutes les installations nucléaires, y compris les installations de stockage de déchets, sont soumises à des objectifs réglementaires de protection de l'Homme et de l'environnement, fixés par l'ASN, en cohérence avec les recommandations de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

» LA COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (CIPR)

Créée en 1928, la CIPR est une organisation non-gouvernementale dont l'objectif est d'apprécier l'état des connaissances sur les effets des rayonnements afin d'identifier leurs implications du point de vue des règles de protection à adopter.

La CIPR analyse les résultats des recherches effectuées dans le monde et examine les travaux d'autres organisations internationales. Elle émet des recommandations générales, destinées, en particulier, aux organismes réglemertaires, sur les règles de protection et les niveaux d'exposition à ne pas dépasser.

D'une manière générale, la conception des installations nucléaires doit viser à maintenir leur impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte-tenu notamment de l'état des techniques et des facteurs économiques et sociaux.

La réglementation française fixe à un millisievert (mSv) la dose efficace[24] maximale (cf. Chapitre 1.1.3 du présent volume) admissible à laquelle chaque personne du public peut être exposée en une année de la part de l'ensemble des activités nucléaires, c'est-à-dire sans compter l'exposition liée à la radioactivité naturelle et les doses reçues lors des examens ou des traitements médicaux[25] (article R. 1333-11 du code de la santé publique).

Pour comparaison, l'exposition efficace moyenne liée à la radioactivité naturelle des Français de métropole est estimée à 2,9 mSv/an du fait de l'exposition du corps entier au radon, aux rayonnements telluriques, aux rayonnements cosmiques, et à l'ingestion d'eau et de denrées alimentaires (cf. Chapitre 1.1.3.2 du présent volume). L'exposition de chaque individu peut varier significativement autour de cette valeur moyenne selon son lieu d'habitation et son mode de vie (4). Les doses susceptibles d'être reçues lors d'examens ou de traitements médicaux peuvent être nettement supérieures à ces valeurs. Ces expositions liées aux pratiques médicales et les risques qu'elles induisent sont compensées par les bénéfices attendus pour la santé des patients.

Concernant les expositions dues aux activités humaines, hors médecine, chaque personne du public est susceptible d'être exposée en parallèle à plusieurs sources de rayonnement, par exemple lorsque plusieurs installations nucléaires coexistent dans une même zone. Pour prendre en compte cette situation, la dose efficace individuelle maximale potentiellement générée par une seule installation, dénommée « contrainte »[26], est réduite à une fraction de la limite réglementaire totale de 1 mSv/an. Ainsi, la somme des expositions ne dépasse pas la limite par individu.

Pour les centres de stockage de déchets radioactifs de l'Andra en exploitation, la contrainte de dose efficace individuelle est fixée, pour chaque centre à 0,25 mSv/an pour le public. Cette contrainte de dose des installations françaises de stockage de déchets radioactifs est du même ordre de grandeur que la contrainte de dose retenue par la CIPR et l'AIEA (0,3 mSv/an (12))

Une dose efficace individuelle de 0,25 mSv correspond à une exposition similaire à la dose que chacun d'entre nous reçoit annuellement par la seule présence, dans notre propre corps, d'éléments radioactifs d'origine naturelle (auto-irradiation). Elle représente environ 10 % de l'exposition efficace moyenne des français de métropole par la radioactivité naturelle.

Si la contrainte de 0,25 mSv/an est applicable à la phase de fonctionnement et de démantèlement/fermeture du centre de stockage Cigéo, elle l'est aussi pendant la phase après fermeture et sur le long terme. En effet, la CIPR stipule que les individus et les populations à l'avenir devraient bénéficier au moins du même niveau de protection vis-à-vis des déchets que la génération actuelle. De plus elle prévoit que soient prises en compte la période d'exploitation de l'installation accueillant les déchets, la période suivante au cours de laquelle la société restera en mesure de mettre en place une surveillance réglementaire et un contrôle administratif du site, mais aussi la période plus lointaine où la société pourrait ne plus être en mesure de garder un œil vigilant sur l'installation, voire où la mémoire de l'installation aurait été perdue.

» LES EXIGENCES DU GUIDE DE SÛRETÉ N° 1 DE L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (ASN) CONCERNANT LES STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE

Le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de l'ASN (43) indique que « *la protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde* ».

Pour s'assurer de l'adéquation du stockage à l'objectif fondamental, le guide de sûreté impose que des évaluations de l'impact radiologique soient effectuées, pendant l'exploitation du centre comme pour toute autre installation nucléaire, ainsi qu'à long terme après sa fermeture : « *Pour la situation de référence après la fermeture de l'installation de stockage, les doses efficaces individuelles calculées ne devront pas excéder la valeur de 0,25 mSv/an pour des expositions prolongées liées à des événements certains ou très probables.* »

L'évaluation de l'impact radiologique sur les personnes dépend de l'état de l'évolution intrinsèque des déchets et de l'installation, mais aussi du mode de vie de ces personnes. Aux grandes échelles de temps, faute de connaitre l'évolution future du mode de vie, le guide de sûreté de l'ASN mentionne de fonder l'évaluation sur l'hypothèse d'une constance de ce mode de vie (consommation de denrées alimentaires, modes d'exposition...).

Plus généralement, le guide de sûreté définit aussi les conditions dans lesquelles l'augmentation des incertitudes avec le temps est à prendre en compte, y compris l'occurrence de « situations altérées ».

Les évaluations de l'impact radiologique après fermeture et à long terme sont présentées dans les volumes IV et VI de la présente étude d'impact.

[24] La « dose efficace » mesure l'exposition d'une personne aux rayonnements en tenant compte de leur impact biologique sur les tissus affectés. Elle s'exprime en sieverts ou millisieverts.

[25] Il s'agit de dose d'exposition du corps entier, sachant que pour les expositions d'un organe ou d'un tissu, on considère des limites de dose équivalentes : ainsi, les limites de doses équivalentes pour le cristallin et pour la peau sont fixées respectivement à 15 mSv/an et à 50 mSv/an.

[26] La notion de contrainte de dose a été introduite en 1991 par la CIPR (Publication 60) (41). C'est une restriction appliquée aux doses résultant de l'exposition à une source unique. Elle vise à réduire les inégalités de distribution des doses entre individus. Elle est reprise par la directive 2013/59/EURATOM du Conseil du 5 décembre 2013 (42) comme étant « *une restriction définie comme plafond prospectif de doses à l'individu, utilisée pour définir l'éventail d'options envisagées dans le processus d'optimisation pour une source de rayonnement donnée en situation d'exposition planifiée* ».

2.2 Le choix du stockage géologique parmi les différentes pistes de gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL

2.2.1 Le contexte

La recherche et l'étude des pistes de gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL a été initiée de longue date dans la plupart des pays ayant développé des programmes nucléaires militaires ou électronucléaires.

En France, le rapport Castaing (1983) (44) et les rapports Goguel produits en 1987 (45) et 1988 (46), présentent déjà des pistes de gestion et une première analyse de leur faisabilité.

En mai 2019, dans le cadre du débat public relatif au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) (21), l'IRSN a établi, à la demande de la Commission nationale du débat public un « Panorama international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue » (47).

Le présent chapitre inventorie les pistes étudiées ou évoquées pour la gestion à long terme des déchets HA et MA-VL et fait le point sur leur maturité technique et sur leurs avantages respectifs pour la gestion des déchets HA et MA-VL.

Ainsi, sont successivement abordées les solutions de gestion potentielles des déchets HA et MA-VL suivantes :

- l'entreposage de longue durée des déchets (cf. Chapitre 2.2.2 du présent volume) ;
- la réduction de la dangerosité des déchets par transmutation (cf. Chapitre 2.2.3 du présent volume) ;
- l'envoi des déchets dans l'espace (cf. Chapitre 2.2.4 du présent volume) ;
- l'évacuation des déchets dans les fonds marins (cf. Chapitre 2.2.5 du présent volume) ;
- le stockage des déchets dans le milieu géologique continental (cf. Chapitre 2.2.6 du présent volume), dont le stockage en forages très profonds et le stockage dans des installations creusées en couche géologique profonde.

Une synthèse comparative des principales solutions de gestion envisagée est ensuite présentée (cf. Chapitre 2.2.7 du présent volume), étant entendu que bien que la voie du stockage en couche géologique profonde soit adoptée internationalement (cf. Chapitre 2.2.8 du présent volume), les recherches sur les solutions alternatives se poursuivent (cf. Chapitre 2.2.9 du présent volume).

2.2.2 L'entreposage de longue durée des déchets

Le code de l'environnement (article L. 542-1-1) définit l'entreposage de matières ou de déchets radioactifs comme « l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, avec intention de les retirer ultérieurement ». Cette définition est équivalente à celles données par la directive européenne du 19 juillet 2011 et par l'AIEA (12).

La gestion des déchets HA et MA-VL peut s'envisager par prolongation de leur entreposage dans des installations du type de celles qui les abritent actuellement (cf. Chapitre 1.3.2 du présent volume). En pratique, cela nécessite la construction périodique de nouvelles installations d'entreposage, puis le transfert des colis de déchets vers ces dernières, éventuellement après reconditionnement.

Une installation centralisée, éventuellement implantée à proximité de la surface, pourrait également être envisagée. Sur la base des technologies et de l'expérience disponibles, l'entreposage de longue durée est applicable à l'ensemble des colis de l'inventaire de référence des colis HA et MA-VL (cf. Chapitre 1.3 du présent volume).

Il est à noter que la stratégie d'entreposage présente pour la génération actuelle un intérêt financier immédiat. En effet, elle diffère les investissements nécessaires à la mise en œuvre d'un dispositif de gestion à caractère définitif. Inversement, les coûts des investissements pour de nouveaux entreposages s'ajoutent au coût global, si un dispositif de gestion à caractère définitif, par exemple un stockage, est décidé dans le futur.

Sur le plan environnemental, la construction d'un ou de plusieurs entreposages de longue durée aurait un impact brut fort, comparable à celui d'un centre de stockage géologique, notamment s'il s'agit d'un entreposage centralisé implanté à proximité de la surface. En effet, une telle installation centralisée nécessiterait le même ordre de grandeur de capacité en termes de volume de colis accueillis et des infrastructures robustes en béton armé. Leur fonctionnement et leur démantèlement aurait un impact modéré. De plus, ils impliqueraient, à terme, de reprendre des activités de transport de substances radioactives en nombre relativement élevé, puisqu'à l'issue de son fonctionnement, il faudrait désentreposer les colis et les transférer vers d'autres installations de gestion.

Jusqu'en 2006, des études et recherches ont été menées par le CEA en vue d'augmenter la durée d'entreposage au sein d'une même installation. L'objectif était de dépasser le siècle dans un entreposage dit « de longue durée ». Les concepts d'installations étudiés, à la surface du sol ou à proximité de la surface (sub-surface), reposent sur un dimensionnement et sur des matériaux spécifiquement choisis pour leur durabilité. Leur fonctionnement est aussi « passif » que possible, c'est-à-dire qu'il requiert le moins d'actions humaines possibles pour la maintenance et la surveillance, jusqu'à ce qu'il soit décidé d'en retirer les colis de déchets. Pour cette raison, l'entreposage produit très peu de nouveaux déchets pendant son fonctionnement. Une durabilité de ces installations jusqu'à trois siècles a été avancée au plan technique. Le principe d'un entreposage de durée encore beaucoup plus longue a parfois été évoqué en se fondant sur l'expérience des pyramides ou mausolées antiques subsistant aujourd'hui. Les études ont néanmoins montré que leur fonctionnement ne pouvait pas être complètement « passif » et qu'une interruption prolongée de la maintenance et de la surveillance des installations pourrait mettre leur sûreté en défaut et entraîner des risques très importants. Une telle interruption pourrait survenir par exemple à la suite d'une crise sociétale et d'une dégradation temporaire du contrôle institutionnel (crise, guerre, abandon...). Un éventuel arrêt de la maintenance et un abandon définitif de telles installations se traduirait, à termes, par des impacts sanitaires et environnementaux majeurs. En effet, la dégradation des installations et la perte du confinement de colis de déchets conservant encore une grande dangerosité, à proximité de la biosphère, aurait des effets négatifs significatifs sur l'Homme et l'environnement. À cet égard, leur implantation en surface ou à proximité de la surface ne les rend pas insensibles aux agressions externes.

» ENTREPOSAGE ET STOCKAGE EN SURFACE ET À FAIBLE PROFONDEUR

Une installation d'entreposage à la surface ou proche de la surface ne doit pas être confondue avec une installation de stockage en surface ou à faible profondeur.

Une installation d'entreposage à la surface ou proche de la surface est conçue pour y conserver les déchets à titre temporaire, avant de les diriger vers une autre installation de gestion (cf. Chapitres 1.2.3.12.2 du présent volume).

L'entreposage de longue durée en surface est une technologie accessible immédiatement. Toutefois, son principal handicap résulte du fait qu'il ne constitue pas un mode de gestion durable de déchets. Les installations d'entreposage en surface requièrent un entretien fréquent (à proximité de colis de déchets présentant une forte dangerosité) et nécessitent d'être renouvelées périodiquement pour maintenir leur niveau de sûreté. L'entreposage en surface de longue durée augmente ainsi le nombre de manutentions et de transports pour entreposer et désentreposer les colis de déchets lors du renouvellement des installations. Elles ne présentent donc pas un caractère pérenne sur le très long terme (plusieurs centaines de milliers d'années) considérant d'une part, la très longue durée pendant laquelle la dangerosité des déchets à vie longue perdure et d'autre part, leur durée de vie limitée (quelques centaines d'années au plus).

Dans son avis du 1er décembre 2020 (16), l'ASN estime que « *les entreposages à faible profondeur ne présentent pas d'avantage déterminant, en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection, par rapport aux entreposages en surface.* » La notion « d'entreposage pérenne » n'est pas conforme au code de l'environnement (article L. 542-1-1). Elle comporte une contradiction interne (oxymore). En termes techniques, et notamment pour la gestion des risques, une installation d'entreposage centralisée de colis de déchets, dès lors qu'elle serait enterrée à faible profondeur, présenterait des spécificités de même nature qu'une installation de stockage en couche géologique profonde (contexte souterrain, galeries de manutention, alvéoles pour les colis, investissements et temps de construction et de développement, transports...). Toutefois, elle ne présenterait pas l'avantage de pouvoir, à terme, être définitivement fermée. Par ailleurs, elle resterait plus sensible aux agressions externes et aux évolutions de l'environnement compte tenu de sa plus faible profondeur et

impliquerait un déplacement des colis et pour ce faire une manutention de ces derniers pour les expédier vers la filière suivante, ce qui augmenterait les risques et les impacts potentiels (cf. Chapitre 2.2.7.5 du présent volume).

A contrario, dans les stockages, il est possible de laisser les déchets sans limite de temps. Des installations de stockage en surface existent en France pour les déchets de très faible activité dits TFA et pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte dits FMA-VC (cf. Chapitre 1.2.3.3 du présent volume). Des concepts de stockage à faible profondeur sont actuellement étudiés par l'Andra pour les déchets de faible activité à vie longue dits FA-VL. Ces derniers sont nettement moins dangereux que les déchets HA et MA-VL. (cf. Chapitre 1.2.3.3 du présent volume). En revanche, le stockage de déchets HA et MA-VL en surface ou à faible profondeur n'est pas possible considérant qu'il ne permettrait pas de respecter durablement les objectifs de protection de l'Homme et de l'environnement fixés par l'Autorité de sûreté (cf. Chapitre 2.1 du présent volume).

En 2006, après évaluation des résultats des études sur l'entreposage de longue durée du CEA, la Commission nationale d'évaluation (48) a estimé que la possibilité de prolonger au-delà d'un maximum de 100 ans, la période d'exploitation d'un entreposage n'était pas démontrée.

Pour sa part, après instruction des études du CEA, l'Autorité de sûreté nucléaire a considéré « *que l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue* » car il « *suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et leur reprise par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années* » (49). À l'issue de son fonctionnement, l'entreposage de longue durée nécessite donc la mise en œuvre d'une filière complémentaire de gestion durable des déchets HA et MA-VL sur le très long terme.

Corollairement, l'entreposage de longue durée pose une question d'éthique intergénérationnelle. En effet une pérennisation de l'entreposage, se limitant à compter sur la capacité des générations suivantes à entretenir et à renouveler les installations, constitue une stratégie d'ajournement de la gestion durable des déchets HA et MA-VL opposée aux exigences du code de l'environnement (cf. Chapitres 1.4 et 2.1 du présent volume)[27]. Elle revient à transmettre aux générations suivantes des déchets de forte dangerosité et les risques associés, sans progrès dans la recherche ou dans la mise en œuvre d'une mise en sécurité définitive. Elle ne constitue pas un mode de gestion responsable.

La directive européenne 2011/70/Euratom du 19 juillet 2011 (11) établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs considère ainsi que « *l'entreposage de déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire qui ne saurait constituer une alternative au stockage* » (considérant n° 21).

Le prolongement de l'entreposage est parfois évoqué comme une solution permettant de reporter de plusieurs dizaines d'années le choix d'un mode de gestion à caractère définitif (cf. Figure 1-6) et de poursuivre dans l'intervalle les recherches sur de nouvelles voies de gestion définitive alternatives au stockage géologique. Les voies de gestion des déchets HA et MA-VL imaginées en alternative au stockage géologique sont présentées à la suite de ce chapitre (cf. Chapitre 2 du présent volume). L'étude de certaines de ces voies n'a pas été poursuivie, notamment pour des raisons de maîtrise des risques, d'autres, parfois très récentes restent à approfondir. Il faut toutefois indiquer que le niveau actuel des avancées techniques amène à la prudence sur la faisabilité industrielle des alternatives qui restent à l'étude. D'autres idées pourront naturellement émerger au fil des développements techniques et des contraintes sociales et environnementales. Toutefois, le report d'une décision relative au stockage géologique, en attente de l'émergence hypothétique d'une solution de gestion alternative, constitue un « pari » qu'il faut mettre en balance avec les dangers et les charges qu'il fait peser sur les générations à venir (cf. Chapitres 1.3 et 2.1 du présent volume) et des incertitudes quant à l'avenir. Inversement, l'engagement progressif d'un stockage des déchets HA et MA-VL n'exonère pas de poursuivre les efforts de recherche pour réduire les risques de leur gestion. Si de nouvelles techniques industrielles venaient à apparaître, utiles pour la gestion des déchets, elles seraient naturellement mises à profit. Toutefois, il est peu probable qu'elles puissent concerner toutes les natures de déchets, notamment ceux déjà conditionnés (vitrifiés, cimentés, métalliques, bitumés...). Elles viendraient donc compléter la voie du stockage, mais celle-ci resterait utile pour les déchets restants.

[27] Selon le code de l'environnement, la gestion durable des déchets a pour objectif leur mise en sécurité définitive pour prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations futures (article L. 542-1).

» LES CONCLUSIONS DE L'ASN RELATIVES A L'ENTREPOSAGE DE LONGUE DUREE DANS SON AVIS DU 1ER FEVRIER 2006 RELATIF AUX RECHERCHES MENEES DANS LE CADRE DE LA LOI DU 30 DECEMBRE 1991

« Les recherches menées sur l'étude des procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée de ces déchets confirment que l'entreposage est une étape nécessaire pour permettre le refroidissement de certains colis de déchets avant leur stockage en formation géologique profonde ».

« En revanche, l'ASN estime qu'il ne serait pas raisonnable de retenir comme solution de référence la solution consistant à renouveler plusieurs fois un entreposage de longue durée, car elle suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et la reprise des déchets par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années ».

« L'ASN considère que l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue ».

Ces conclusions ont été rappelées par l'ASN dans son avis du 1er décembre 2020 (16).

2.2.3 La réduction de la dangerosité des déchets par la transmutation

2.2.3.1 Le principe de la transmutation

La réduction de la dangerosité des déchets HA et MA-VL est une piste technique qui vise à faciliter les étapes de leur gestion à long terme ou même à accéder directement à leur mise en sécurité définitive si leur dangerosité peut être annihilée.

L'une des pistes étudiées pour réduire la dangerosité des déchets radioactifs est la transmutation des radionucléides contenus dans les déchets et plus particulièrement les radionucléides à vies longues, par exemple l'Américium 243 (période de 7380 ans) ou l'iode 129 (15,7 millions d'années)[28].

La transmutation est une réaction nucléaire (cf. Figure 2-1). Comme toutes les réactions nucléaires, naturelles ou artificielles (cf. Chapitre 1.1.1 du présent volume), elle transforme des atomes en d'autres atomes de nature chimique différente. Les réactions nucléaires de fission et de fusion ou les désintégrations associées à la décroissance radioactive mettent en œuvre des transmutations.

L'objectif de son utilisation pour la gestion des déchets consiste à transformer ces radionucléides à vie longue en d'autres radionucléides de période plus courte et qui cessent donc plus rapidement d'être nocifs, ou de les transformer en des éléments possédant une dangerosité plus faible. Les réactions de transmutation artificielle, pour la gestion des déchets, ne peuvent être effectuées qu'au sein de réacteurs nucléaires. La transmutation nécessite donc le développement de nouvelles installations.

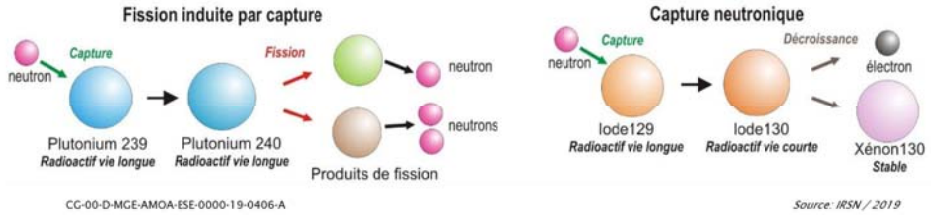


Figure 2-1 Transmutation par fission (à gauche) ou par capture de neutron (à droite) (47)

La séparation et la transmutation ont été étudiées notamment par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) depuis 1991 dans le cadre d'un programme de recherche dédié fixé par la loi (50) (cf. Figure 2-2).

Figure 2-2 Fabrication par voie sèche (broyage, pressage, frittage et gainage) de combustibles d'études, cibles de transmutation et matrices de confinement. © A. Gonin/CEA

» LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES EN RÉACTEUR : L'EXEMPLE DE LA FISSION DE L'URANIUM 235

La fission nucléaire est le phénomène par lequel un noyau lourd (c'est-à-dire composé d'un grand nombre de protons et de neutrons, par exemple l'uranium ou le plutonium) est désintégré par division, généralement en deux noyaux plus légers. Il existe des fissions spontanées et des fissions induites.

La fission spontanée correspond à la désintégration d'un noyau sans apport d'énergie extérieure. Elle n'est possible que pour les noyaux les plus lourds.

La fission induite a lieu lorsqu'un noyau lourd se désintègre sous l'effet d'une énergie externe, généralement la capture d'un neutron. C'est le cas de l'isotope 235 de l'uranium naturel.

En réacteur, uranium235 peut absorber un neutron et se fragmenter en produits de fission par des réactions de fission qui produisent elles-mêmes des neutrons (cf. Figure 2-3).

Un autre isotope présent dans l'uranium naturel, l'uranium235 peut se transformer par capture d'un neutron, puis désintégration, en plutonium (plutonium 239) qui peut se fissionner à son tour. La capture des neutrons peut aussi former d'autres actinides dits « mineurs » (neptunium, américium, curium).

À l'issue des procédés de traitement chimique effectué sur les combustibles usés, sont extraits des combustibles de retraitement (uranium et plutonium) et des produits de fissions et actinides mineurs. Ces deux derniers constituent *in fine* les déchets.

[28] Actinides : famille de composés radioactifs utilisés dans des réacteurs nucléaires, existant à l'état naturel comme l'uranium et le thorium ou synthétisés par l'industrie nucléaire comme le plutonium.