



RAPPORT DE SYNTHÈSE

Inventaire national des matières et déchets radioactifs

20
18





01

LES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS ET LEUR GESTION

6

L'origine des matières et déchets radioactifs	8
La classification des déchets radioactifs et leurs filières de gestion	12
Les cas particuliers	16
Les matières radioactives	17
Les principes généraux de la gestion des matières et déchets radioactifs	20

02

BILAN DES STOCKS À FIN 2016

24

BILAN DES STOCKS PAR CATÉGORIE À FIN 2016

27

Les déchets radioactifs	27
Les matières radioactives	34

BILAN DES STOCKS PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE

37

Secteur électronucléaire	38
Secteur de la recherche	46
Secteur de la défense	49
Secteur de l'industrie non-électronucléaire	51
Secteur médical	53

03

LES INVENTAIRES PROSPECTIFS

54

PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS

POUR LA DÉTERMINATION DES INVENTAIRES PROSPECTIFS

58

SR1 : renouvellement du parc électronucléaire par des EPR puis RNR	58
SR2 : renouvellement du parc électronucléaire bis par des EPR et RNR	58
SR3 : renouvellement du parc électronucléaire par des EPR uniquement	59
SNR : non-renouvellement du parc électronucléaire	61

SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS

63

ESTIMATION DES QUANTITÉS DE MATIÈRES ET DÉCHETS À DES DATES INTERMÉDIAIRES

66

Pour le scénario SR1	66
Pour le scénario SR2	68

LES VOLUMES DE DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT

69

Principes de gestion des déchets issus du démantèlement	69
Nature des déchets issus du démantèlement	69
Estimation des quantités de déchets issus du démantèlement	69

04	LES MODES DE GESTION SPÉCIFIQUES	72
	LA GESTION DES SITUATIONS HISTORIQUES	74
	Les stockages historiques de déchets radioactifs dans les installations de stockage de déchets conventionnels	74
	Les stockages historiques de déchets situés au sein ou à proximité d'installations nucléaires de base et de base secrète	76
	Les dépôts historiques de déchets à radioactivité naturelle élevée	78
	Les stockages de la défense en Polynésie française	79
	L'immersion des déchets	79
	LA GESTION DES RÉSIDUS DE TRAITEMENT DES MINES D'URANIUM	80
	LA GESTION ACTUELLE DES DÉCHETS À RADIOACTIVITÉ NATURELLE ÉLEVÉE	82
05	LES DOSSIERS THÉMATIQUES	84
	Dossier 1 - Les solutions existantes et en projet en France pour la gestion à long terme des déchets radioactifs	86
	Dossier 2 - Traitement et conditionnement des déchets radioactifs	94
	Dossier 3 - Démantèlement et assainissement des installations nucléaires	102
	Dossier 4 - Les sites pollués par la radioactivité	112
	Dossier 5 - Les déchets radioactifs du secteur médical	120
	Dossier 6 - Les sources scellées	134
	Dossier 7 - Les inventaires des déchets radioactifs à l'étranger	144
06	LES ANNEXES ET GLOSSAIRE	158
	Annexe 01 - Méthodologie d'élaboration de l'Inventaire national	160
	Annexe 02 - L'activité des déchets radioactifs	164
	Glossaire et abréviations	170





LES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS ET LEUR GESTION

L'ORIGINE DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS	8
LA CLASSIFICATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS ET LEURS FILIÈRES DE GESTION	12
LES CAS PARTICULIERS	16
LES MATIÈRES RADIOACTIVES	17
LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA GESTION DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS	20

L'ORIGINE DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

L'Inventaire national décrit l'origine des matières et déchets radioactifs selon cinq secteurs économiques conduisant à la production, la détention ou la gestion de matières et déchets radioactifs :

- **le secteur électronucléaire** qui comprend principalement les centres nucléaires de production d'électricité, ainsi que les usines dédiées à la fabrication du combustible nucléaire (extraction et traitement du minerai d'uranium, conversion chimique et enrichissement des concentrés d'uranium), au retraitement du combustible nucléaire usé et au recyclage d'une partie des matières extraites de ce dernier ;
- **le secteur de la recherche** qui comprend la recherche dans le domaine du nucléaire civil (notamment les activités de recherche du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), du médical, de la physique nucléaire et des particules, d'agronomie, de chimie, de biologie, etc. ;
- **le secteur de la défense**, il s'agit principalement de la force de dissuasion, dont la propulsion nucléaire de certains navires ou sous-marins, de la recherche associée, mais également les activités liées aux armées ;
- **le secteur de l'industrie non-électronucléaire** qui comprend notamment l'extraction de terres rares, la fabrication de sources scellées mais aussi diverses applications comme le contrôle de soudure, la stérilisation de matériel médical, la stérilisation et la conservation de produits alimentaires, etc. ;
- **le secteur médical** qui comprend les activités diagnostiques et thérapeutiques (scintigraphies, radiothérapies, etc.).

Les secteurs qui contribuent le plus à la production de déchets radioactifs en France sont les secteurs de l'électronucléaire, de la recherche et de la défense.

Conformément à l'article L. 542-1 du Code de l'environnement, les producteurs de déchets radioactifs sont responsables de la bonne gestion de leurs déchets avant leur évacuation vers un exutoire définitif et de la bonne gestion de leurs matières assurant le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement.

ARTICLE L. 542-1 DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT

L'article L. 542-1 du Code de l'environnement dispose que « 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.

Les producteurs de combustibles usés et de déchets radioactifs sont responsables de ces substances, sans préjudice de la responsabilité de leurs détenteurs en tant que responsables d'activités nucléaires. En cas de défaillance de leurs producteurs ou de leurs détenteurs, l'État est responsable en dernier ressort de ces substances lorsqu'elles ont été produites sur le territoire national et peut charger l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs d'en assurer la gestion en application de l'article L. 542-12. »

Radioactivité naturelle et artificielle

Les substances radioactives peuvent avoir une origine naturelle ou être la conséquence d'activités humaines.

Les sources naturelles de radioactivité sont nombreuses : minerais (isotopes d'uranium et de thorium, potassium 40, ou éléments en filiation comme le radium et le radon), rayonnement cosmique (tritium, carbone 14), etc. Ces radionucléides naturels sont répartis dans toute la biosphère. La concentration en radionucléides est extrêmement variable selon le matériau et son origine : l'exposition aux radionucléides d'origine naturelle peut varier de plus d'un ordre de grandeur selon les régions du monde (de 2,9 mSv/an en moyenne en France à plus de 50 mSv/an dans certaines régions de l'Inde ou du Brésil).

Les nombreuses utilisations des propriétés de la radioactivité produisent, depuis le début du xx^e siècle, des matières et déchets radioactifs. Ils proviennent pour l'essentiel des centres nucléaires de production d'électricité, des usines de retraitement des combustibles usés et des autres installations nucléaires civiles et militaires.

Les laboratoires de recherche et les services de médecine nucléaire contribuent aussi, à un degré moindre, à la production de déchets radioactifs, tout comme certaines industries utilisant des substances radioactives.

ARTICLE L. 542-1-1 DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT

L'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement définit un certain nombre de notions qu'il est utile de rappeler pour aborder l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs.

Substance, matière et déchet radioactif

« Une substance radioactive est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection. »

Ces substances radioactives peuvent être qualifiées de matières radioactives ou de déchets radioactifs :

« Une matière radioactive est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement. »

Dans certains cas, le traitement des matières en vue de leur valorisation peut engendrer des déchets.

« Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée ou qui ont été requalifiées comme tels par l'autorité administrative en application de l'article L. 542-13-2. 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. La gestion des déchets radioactifs comprend toutes les activités liées à la manipulation, au prétraitement, au traitement, au conditionnement, à l'entreposage et au stockage des déchets radioactifs, à l'exclusion du transport hors site. »

En application de l'article L. 542-13-2, une matière radioactive peut être requalifiée en déchet radioactif par l'autorité administrative, après avis de l'ASN, si ses perspectives de valorisation ne sont pas suffisamment établies.

Contrôle de radioprotection

En France, lorsqu'une substance contient des radionucléides, la justification du contrôle de radioprotection n'est pas nécessairement établie à partir d'un seuil d'activité ou de concentration par radionucléide. La justification d'un tel contrôle est, à titre conservatoire, présumée établie lorsque des substances proviennent d'une activité dite nucléaire et qu'elles sont contaminées, activées ou susceptibles de l'être.

Les activités nucléaires (*article L. 1333-1 du Code de la santé publique*) sont des « activités comportant un risque d'exposition des personnes aux rayonnements ionisants lié à la mise en œuvre soit d'une source artificielle, qu'il s'agisse de substances ou de dispositifs, soit d'une source naturelle, qu'il s'agisse de substances radioactives naturelles ou de matériaux contenant des radionucléides naturels ». Dans le cadre de la transposition de la directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants, cette notion d'activité nucléaire a été étendue par l'article L. 515-43 du Code de l'environnement portant diverses dispositions en matière nucléaire à l'ensemble des sources naturelles de radioactivité à partir du moment où elles justifient la mise en place de contrôles de radioprotection.

Pour les activités nucléaires relevant du régime des Installations nucléaires de base (INB), des Installations nucléaires de base secrètes (INBS), les Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et pour celles autorisées, enregistrées ou déclarées au titre du Code de la santé publique, tout déchet

contaminé, activé ou susceptible de l'être doit, à titre conservatoire, être géré comme s'il était radioactif. Ainsi, il doit faire l'objet d'une gestion spécifique et renforcée qui inclut notamment le stockage des déchets ultimes dans un centre dédié aux déchets radioactifs. En application de la directive 2013/59/Euratom du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants, les États membres de l'Union européenne peuvent mettre en œuvre des seuils dits de libération en deçà desquels les matériaux considérés sortent du domaine réglementé en matière de réglementation relative à la radioactivité. Lorsque le concept de seuils de libération est utilisé, en fonction des pays, ces seuils peuvent être, pour un radioélément donné, soit universels (quels que soient le matériau, son origine et sa destination), soit dépendant du matériau, de son origine et de sa destination.

La réglementation française ne prévoit pas, à ce jour, de principe de libération des déchets de très faible activité.

Pour les activités qui n'étaient pas considérées comme nucléaires avant la nouvelle définition instaurée par l'ordonnance du 10 février 2016, la justification ou non d'un contrôle de radioprotection est appréciée selon le critère d'une exposition limitée : la somme des doses efficaces dues à ces activités reçues par toute personne exposée ne doit pas dépasser 1 mSv/an (*article R. 1333-38 du Code de la santé publique*), et selon une étude d'acceptabilité relative à l'impact radiologique associé à la prise en charge des déchets qui doit démontrer qu'un contrôle de radioprotection n'est pas justifié. Dans ce cas, le déchet peut, sous certaines conditions, ne plus être considéré comme radioactif. Les déchets concernés sont notamment des déchets à radioactivité naturelle élevée (NORM). Dans le cadre de la transposition de la directive 2013/59, ces modalités de gestion seront revues dans la mesure où les activités mettant en œuvre des radionucléides d'origine naturelle dont les expositions ne peuvent être négligées du point de vue de la radioprotection seront désormais considérées comme des activités nucléaires.

Gestion des combustibles usés en France

« Un combustible nucléaire est regardé comme un combustible usé lorsque, après avoir été irradié dans le cœur d'un réacteur, il en est définitivement retiré. La gestion du combustible usé comprend toutes les activités liées à la manipulation, à l'entreposage, au retraitement ou au stockage des combustibles usés, à l'exclusion du transport hors site. »

La France ayant fait le choix de retraiter les combustibles usés pour récupérer les matières valorisables qu'ils contiennent, ceux-ci ne sont pas considérés comme des déchets radioactifs. Le retraitement des combustibles usés est un traitement dont l'objet est d'extraire les substances fissiles ou fertiles des combustibles usés aux fins d'utilisation ultérieure.

Rejets

Les activités utilisant des substances radioactives peuvent être à l'origine de rejets contrôlés dans l'environnement, sous forme gazeuse ou liquide. Ces rejets ne relèvent pas du champ de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs.

Les rejets provenant d'INB sont décrits et quantifiés dans les rapports publics dus chaque année par leurs exploitants au titre des articles L. 125-15 et 16 du Code de l'environnement. Les données concernant les rejets des ICPE sont rassemblées chaque année par le ministère de la Transition écologique et solidaire.

PRÉCISIONS

Producteur de déchets

« Toute personne dont l'activité produit des déchets (producteur initial de déchets) ou toute personne qui effectue des opérations de traitement des déchets conduisant à un changement de la nature ou de la composition de ces déchets (producteur subséquent de déchets) » (*article L. 541-1-1 du Code de l'environnement*).

Détenteur de déchets

« Producteur des déchets ou toute autre personne qui se trouve en possession des déchets » (*article L. 541-1-1 du Code de l'environnement*).

Un déchet radioactif peut avoir plusieurs détenteurs entre le moment où il est produit et le moment où il est éliminé (successivement le détenteur-producteur, puis le transporteur, l'exploitant de l'entrepôt, l'exploitant du stockage).

Gestion des déchets

« La collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets et, plus largement, toute activité participant de l'organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu'à leur traitement final, y compris les activités de négoce ou de courtage et la supervision de l'ensemble de ces opérations » (*article L. 541-1-1 du Code de l'environnement*).

Responsabilités

« Tout producteur ou détenteur de déchets est tenu d'en assurer ou d'en faire assurer la gestion, conformément aux dispositions du présent chapitre.

Tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ces déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers.

Tout producteur ou détenteur de déchets s'assure que la personne à qui il les remet est autorisée à les prendre en charge » (*article L. 541-2 du Code de l'environnement*).

« Les producteurs de combustibles usés et de déchets radioactifs sont responsables de ces substances, sans préjudice de la responsabilité de leurs détenteurs en tant que responsables d'activités nucléaires. En cas de défaillance de leurs producteurs ou de leurs détenteurs, l'État est responsable en dernier ressort de ces substances lorsqu'elles ont été produites sur le territoire national et peut charger l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs d'en assurer la gestion en application de l'article L. 542-12 » (*article L. 542-1 du Code de l'environnement*).

Ces dispositions signifient que le producteur est responsable de ses déchets et des obligations qui lui incombent jusqu'à leur élimination finale en application de l'article L.541-2 (faire assurer la gestion, traiter ou faire traiter les déchets, garantir la qualité et les propriétés des déchets, assumer les coûts, les dommages que pourraient induire les déchets).

Les détenteurs non producteurs sont uniquement responsables de leurs activités nucléaires (sécurité et sûreté des installations, des activités et des déchets transportés, entreposés, stockés).

LES OBLIGATIONS DÉCLARATIVES À L'INVENTAIRE NATIONAL

Ces obligations ont été définies dans le Code de l'environnement aux articles R. 542-67 à R. 542-72¹ :

Article R. 542-67 : « Aux fins de réaliser l'Inventaire national prévu au 1° de l'article L. 542-12, tout exploitant d'un site accueillant soit une ou plusieurs installations nucléaires de base, soit une ou plusieurs installations nucléaires intéressant la défense mentionnées à l'article L. 1333-15 du Code de la défense, soit une ou plusieurs installations classées pour la protection de l'environnement au titre des activités nucléaires visées à l'annexe (1) à l'article R. 511-9 du Code de l'environnement, soit plusieurs de ces catégories d'installations est tenu de transmettre chaque année à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs un inventaire des matières et déchets radioactifs présents sur ce site, arrêté au 31 décembre de l'année écoulée.

L'inventaire, assorti d'une présentation sommaire du site et de l'indication du régime administratif dont il relève, comporte la description des matières et déchets radioactifs selon leurs caractéristiques physiques et leur importance quantitative. Les déchets radioactifs sont répartis par famille.

Lorsque le site comprend une installation nucléaire de base présentant le caractère d'un réacteur nucléaire, d'une usine de retraitement de combustibles nucléaires usés, d'une installation d'entreposage ou de stockage de substances radioactives, l'exploitant complète l'inventaire annuel par une annexe indiquant la répartition par producteur et par famille des déchets radioactifs présents sur ce site.

Pour une installation nucléaire intéressant la défense mentionnée au premier alinéa du présent article, l'inventaire ne comporte que la description des déchets radioactifs se rapportant à cette installation. »

Article R. 542-68 : « Toute personne responsable d'activités nucléaires qui n'entre pas dans les prévisions de l'article R. 542-67 du présent Code est tenue de transmettre à l'Andra un inventaire des déchets radioactifs détenus, arrêté au 31 décembre de l'année écoulée, en indiquant la filière de gestion utilisée. »

Article R. 542-69 : « Tout exploitant d'un site mentionné à l'article R. 542-67 est tenu de transmettre tous les trois ans à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs un rapport comportant pour ce site des informations sur les quantités prévisionnelles de matières radioactives et de déchets radioactifs par famille. En l'absence d'une solution de gestion définitive adaptée à ces déchets, le rapport précise les types d'installations d'entreposage envisagées, leurs capacités disponibles et leur durée prévisionnelle d'exploitation.

Pour une installation nucléaire intéressant la défense mentionnée au premier alinéa de l'article R. 542-67, le rapport triennal ne comporte que la description des déchets radioactifs se rapportant à cette installation. »

Article R. 542-72 : « Un arrêté des ministres chargés de l'énergie et de la sûreté nucléaire détermine les modalités d'application de la présente section. Il précise la nature des informations devant figurer dans les inventaires et rapports exigés, notamment la notion de famille de déchets et les dates de référence à prendre en compte. Il fixe les délais et les modalités de communication des documents à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. »

¹ Ces articles ont codifié les dispositions du décret n° 2008-875 du 29 août 2008 pris pour l'application de l'article 22 de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

LA CLASSIFICATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS ET LEURS FILIÈRES DE GESTION

En France, la classification des déchets radioactifs repose principalement sur deux paramètres importants pour définir le mode de gestion approprié : le niveau de radioactivité et la période radioactive des radionucléides présents dans le déchet.

Concernant le niveau de radioactivité des déchets, on distingue les déchets de :

- très faible activité (TFA) avec une activité inférieure à 100 becquerels par gramme ;
- faible activité (FA) avec une activité comprise entre quelques centaines de becquerels par gramme et un million de becquerels par gramme ;
- moyenne activité (MA) avec une activité de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme ;
- haute activité (HA) avec une activité de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme.

Concernant la période radioactive, on distingue :

- les déchets dits à vie très courte (VTC) qui contiennent des radionucléides dont la période est inférieure à 100 jours ;
- les déchets dits à vie courte (VC) dont la radioactivité provient principalement de radionucléides qui ont une période inférieure ou égale à 31 ans ;
- les déchets dits à vie longue (VL) qui contiennent une quantité importante de radionucléides dont la période est supérieure à 31 ans.



La période radioactive est le temps au bout duquel la moitié de la quantité d'un même radionucléide aura naturellement disparu par désintégration. Le niveau de radioactivité d'un échantillon contenant des atomes de ce seul radionucléide est donc divisé par deux. Au bout de 10 périodes, le niveau de radioactivité est divisé par 1 000.

La prise en charge de chaque type de déchet nécessite la mise en œuvre ou le développement de moyens spécifiques appropriés à la dangerosité qu'il présente et à son évolution dans le temps.

Il existe ainsi plusieurs catégories de déchets qui font ou feront l'objet d'une gestion particulière.



La nature physique et chimique, le niveau et le type de radioactivité, sont autant de caractéristiques qui diffèrent d'un déchet à un autre. Les déchets radioactifs contiennent en général un mélange de radionucléides (césium, cobalt, strontium, etc.). En fonction de leur composition, ils sont plus ou moins radioactifs, pendant plus ou moins longtemps.



LES DÉCHETS DE HAUTE ACTIVITÉ

Ces déchets rassemblent, dans un volume réduit, la plus grande partie de la radioactivité des déchets. Le niveau de radioactivité des déchets HA se situe à des niveaux de plusieurs milliards de becquerels par gramme. Ils proviennent pour l'essentiel de l'industrie électronucléaire et des activités de recherche associées, ainsi que dans une moindre mesure des activités liées à la défense nationale. Ils sont principalement constitués par les substances non valorisables issues du retraitement des combustibles usés. La plupart de ces déchets sont incorporés dans du verre puis conditionnés dans des fûts en acier inoxydable. En raison de leur radioactivité élevée, ces déchets dégagent de la chaleur.



Colis CSD-V

Ils contiennent :

- des produits de fission à vie courte comme, par exemple, le césium 134 et le césium 137 ;
- des produits de fission à vie longue comme le technétium 99 ;
- des produits d'activation et des actinides mineurs dont certains ont des périodes plurimillénaires, comme le neptunium 237.

MA-VL LES DÉCHETS DE MOYENNE ACTIVITÉ À VIE LONGUE

Ces déchets sont principalement issus du retraitement des combustibles usés et des activités de maintenance et de fonctionnement des usines de retraitement. Il s'agit notamment des déchets de structure des assemblages de combustibles (embouts et coques), de déchets technologiques (outils usagés, équipements, etc.) et de déchets issus du traitement des effluents comme certaines boues. Ils se caractérisent par une présence significative de radionucléides à vie longue comme le nickel 63 (période 100 ans).

Les autres types de déchets MA-VL proviennent des composants qui ont été activés lors de leur exposition au flux de neutrons des réacteurs.

L'activité de ces déchets est de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme, soit un facteur 10 à 100 inférieur aux déchets HA.



Coques issues des gaines en alliage de zirconium qui enrobent les pastilles de combustible



Les déchets HA et MA-VL sont actuellement entreposés dans l'attente de disposer d'une solution de gestion à long terme. Après 15 ans de recherche, l'article L. 542-12 du Code de l'environnement a retenu le stockage géologique profond comme solution de référence pour ces déchets ultimes et a chargé l'Andra de mener des études et des recherches pour choisir un site et concevoir un centre de stockage réversible profond, pour accueillir ces déchets. Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) est le projet français de centre de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde (à 500 mètres de profondeur) (voir dossier thématique 01).

FA-VL LES DÉCHETS DE FAIBLE ACTIVITÉ À VIE LONGUE

Ils regroupent :

- les déchets radifères provenant en majorité d'activités industrielles non nucléaires comme certains travaux de recherche et de traitement de minéraux contenant des terres rares. D'autres déchets radifères peuvent également provenir de l'assainissement de sites historiquement pollués au radium, dont l'Andra assure la mise en sécurité au titre de sa mission d'intérêt général. Le niveau de radioactivité de ces déchets est en général compris entre quelques dizaines et quelques milliers de becquerels par gramme. Les radionucléides qu'ils contiennent sont essentiellement des émetteurs alpha à vie longue, comme le radium, l'uranium ou le thorium ;
- les déchets de graphite provenant du fonctionnement et du démantèlement des premiers réacteurs nucléaires (réacteurs UNGG : uranium naturel, graphite – gaz) et de certains réacteurs expérimentaux aujourd'hui arrêtés. Ce type de déchets présente un niveau de radioactivité se situant entre 10 000 et 100 000 becquerels par gramme et contient essentiellement des radionucléides émetteurs bêta à vie longue. À court terme, l'activité des déchets de graphite est principalement due au nickel 63, au tritium et au cobalt 60. À plus long terme, le carbone 14 devient le contributeur majoritaire à l'activité ;
- d'autres types de déchets tels que certains colis de déchets anciens conditionnés dans du bitume et des résidus de traitement de conversion de l'uranium issus de l'usine d'Orano située à Malvézi, des déchets d'exploitation de l'usine de retraitement de La Hague.

Le stockage à faible profondeur est aujourd'hui à l'étude pour ce type de déchets, dans le cadre de l'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement.



Chemise en graphite avec fils de selles

FMA-VC LES DÉCHETS DE FAIBLE ET MOYENNE ACTIVITÉ À VIE COURTE

Ce sont essentiellement des déchets liés à la maintenance (vêtements, outils, filtres, etc.), au fonctionnement (traitement d'effluents liquides ou filtration des effluents gazeux) et au démantèlement des centres nucléaires, des installations du cycle du combustible et des centres de recherche.

Les déchets FMA-VC contiennent majoritairement des radionucléides à vie courte, de période radioactive inférieure ou égale à 31 ans comme le cobalt 60 ou le césium 137. Ils peuvent aussi contenir des radionucléides à vie longue, en quantité limitée.

Le niveau de radioactivité de ces déchets se situe en général entre quelques centaines de becquerels par gramme et un million de becquerels par gramme.

Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte sont stockés en surface et sont surveillés pendant le temps nécessaire à la décroissance de leur radioactivité jusqu'à des niveaux d'impact négligeables. Sur les sites de stockage de l'Andra, on considère en général que ce niveau est atteint en 300 ans, durée qui correspond à environ 10 périodes et permettant de diviser par 1 000 le niveau de radioactivité. Ces centres seront donc surveillés pendant au moins 300 ans.



Déchets issus de l'utilisation de produits radioactifs dans un laboratoire

Il existe en France deux sites dédiés au stockage des déchets FMA-VC : le Centre de stockage de la Manche (CSM) et le Centre de stockage de l'Aube (CSA).

Le CSM n'accueille plus de déchets depuis 1994 et est en phase de fermeture, tandis que le CSA est en activité depuis 1992, sur les communes de Soullaines-Dhuys, Épothémont et la Ville-aux-Bois.

Parmi les déchets FMA-VC, les déchets T-FMA-VC peuvent être distingués. Il s'agit de déchets de faible et moyenne activité à vie courte contenant une quantité notable de tritium. Bien que le tritium soit un radionucléide à vie courte, il se confine difficilement et peut facilement migrer vers l'environnement et le marquer. Les

déchets tritiés sont, en grande majorité, des déchets solides. Les déchets liquides et gazeux, dont les quantités sont très faibles, doivent être traités et stabilisés avant de rejoindre un entreposage. Après une cinquantaine d'années d'entreposage, ces déchets sont orientés, en fonction de leur radioactivité et du taux de dégazage résiduel, vers le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) ou vers le Centre de stockage de l'Aube (CSA) exploités par l'Andra.

TFA LES DÉCHETS DE TRÈS FAIBLE ACTIVITÉ

Les déchets TFA sont majoritairement issus du fonctionnement, de la maintenance et du démantèlement des centres nucléaires de production d'électricité, des installations du cycle du combustible et des centres de recherche. Ils proviennent également des industries classiques utilisant des matériaux naturellement radioactifs. Ils se présentent généralement sous forme de déchets inertes (béton, gravats, terres), de déchets métalliques ou plastiques.

La production de ces déchets évoluera notablement avec le démantèlement des centres nucléaires de production d'électricité actuellement en fonctionnement ou des installations du cycle du combustible et des centres de recherche.

Le niveau de radioactivité de ces déchets est en général inférieur à 100 becquerels par gramme.

Actuellement ces déchets sont stockés au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) situé sur les communes de Morvilliers et de La Chaise et mis en service en août 2003. Dans le cadre du PNGMDR, des études sont en cours sur la faisabilité de créer, sur ou à proximité des sites produisant des déchets TFA, des installations de stockages adaptées à certaines typologies de déchets TFA dont les caractéristiques permettraient d'envisager, dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement, un stockage dans des installations dédiées autres que le Cires.



Déchets TFA

VTC LES DÉCHETS À VIE TRÈS COURTE

Certains déchets proviennent majoritairement du secteur médical ou de la recherche et contiennent des radionucléides à vie très courte (dont la période radioactive est inférieure à 100 jours) utilisés à des fins diagnostiques ou thérapeutiques. Ils sont gérés par décroissance : ces déchets sont entreposés sur place, de quelques jours à quelques mois, temps pour que leur radioactivité diminue suffisamment afin d'être évacués dans des filières conventionnelles.

Pour le médical, il peut s'agir d'effluents liquides ou gazeux, de déchets solides ou liquides contaminés générés par l'utilisation de radionucléides dans ce domaine.



Cuves de décroissance

Cette classification permet schématiquement d'associer à chaque catégorie de déchets un ou plusieurs modes de gestion (voir dossier thématique 1).

Elle ne prend toutefois pas en compte certains degrés de complexité qui conduisent à retenir une filière de gestion différente de celle correspondant à la catégorie à laquelle le déchet est assimilé.

D'autres critères, tels que la stabilité ou la présence de substances chimiques toxiques, doivent également être pris en compte.

Par ailleurs, la définition d'un mode de gestion doit tenir compte des principes et orientations définis dans le Code de l'environnement, dont notamment la nécessité de réduire le volume et la nocivité des déchets radioactifs ultimes. Il convient donc de souligner deux aspects importants concernant la classification des déchets radioactifs :

- il n'existe pas de critère de classement unique permettant de déterminer la catégorie d'un déchet. Il est en effet nécessaire d'étudier la radioactivité des différents radionucléides présents dans le déchet pour le positionner dans la classification. Cependant, à défaut d'un critère unique, les déchets de chaque catégorie se situent en général dans une gamme de radioactivité massique indiquée dans les paragraphes précédents ;
- un déchet peut relever d'une catégorie définie, mais peut ne pas être accepté dans l'exutoire final correspondant du fait d'autres caractéristiques (sa composition chimique, par exemple).

De plus, l'amélioration de la connaissance des déchets, lors de leur reprise ou du démantèlement des installations, l'avancée des études menées sur l'optimisation des modes de traitement et de conditionnement ainsi que les études de conception des stockages à l'étude ou en projet, peuvent faire évoluer les options de gestion des déchets.

CLASSIFICATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS ET FILIÈRES DE GESTION ASSOCIÉES

Catégorie	Déchets dits à vie très courte	Déchets dits à vie courte	Déchets dits à vie longue
Très faible activité (TFA)	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
Faible activité (FA)		 Stockage de surface (Centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	
Moyenne activité (MA)		Non applicable	 HA
Haute activité (HA)	Non applicable		

LES CAS PARTICULIERS

LES DÉCHETS À RADIOACTIVITÉ NATURELLE ÉLEVÉE (NORM)

Les déchets à radioactivité naturelle élevée sont générés par l'utilisation ou la transformation de matières premières naturellement riches en radionucléides naturels (NORM), mais qui ne sont pas utilisées pour leurs propriétés radioactives. Il s'agit de déchets de type faible activité à vie longue, voire de très faible activité.

Ces radionucléides peuvent se retrouver dans les matériaux ou déchets et nécessitent une gestion particulière.

Les radionucléides naturels pris en compte pour les déchets à radioactivité naturelle élevée sont ceux des chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232, ainsi que le potassium 40, contenus dans des matériaux utilisés dans des procédés industriels. Les procédés industriels peuvent concentrer ou renforcer la radioactivité naturelle présente dans certains produits utilisés et en particulier dans les résidus qu'ils génèrent.

Il s'agit notamment de déchets issus d'industries chimiques ou métallurgiques (engrais phosphatés, terres rares, sables de zircon, etc.).

La circulaire du 25 juillet 2006¹ offre notamment, pour ces déchets particuliers et dans un cadre strict, la possibilité d'une gestion spécifique par acceptation dans une installation de stockage de déchets conventionnels.

Il peut s'agir par exemple de stocker des produits de démolition d'anciennes usines, des équipements, des résidus de procédés.



La gestion des déchets à radioactivité naturelle élevée va être profondément modifiée par le décret n° 2018-434 du 4 juin 2018² qui entre en vigueur le 1^{er} juillet 2018 et qui transpose des dispositions de la directive 2013/59/Euratom du conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants.

LES DÉCHETS SANS FILIÈRE

Il est parfois impossible d'associer une catégorie à certains déchets, soit pour des raisons de non-acceptabilité dans les filières de gestion existantes au regard de certaines de leurs caractéristiques, notamment chimiques, soit parce que les procédés de traitement ou de conditionnement ne sont pas disponibles ou particulièrement complexes à développer au regard de volumes parfois faibles.

On peut citer par exemple certaines huiles et certains liquides organiques qui ne peuvent être incinérés ou encore les déchets contenant du mercure.

Le suivi du développement et de la mise en place de procédés de traitement de ces déchets est assuré dans le cadre du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR). Les déchets sans filière sont pour la plupart entreposés sur leur site de production. Ils sont répertoriés dans l'Inventaire national.

LES DÉCHETS EN STOCKAGES HISTORIQUES

Certains déchets radioactifs ont pu, par le passé, faire l'objet de modalités de gestion qui ont, depuis, évolué.

Ces déchets ont pu être stockés au sein ou à proximité d'installations nucléaires, dans des installations de stockage de déchets conventionnels, sur d'anciens sites industriels ou encore en activité ou à proximité de ces sites, ou immergés.

LES RÉSIDUS DE TRAITEMENT DES MINES D'URANIUM

Les déchets miniers recensés dans l'Inventaire national sont le plus souvent stockés sur ou à proximité des anciens sites miniers et correspondent à des déchets de type TFA ou FA-VL (voir chapitre 4).

1 Circulaire du 25 juillet 2006 relative aux Installations classées – Acceptation de déchets à radioactivité naturelle renforcée ou concentrée dans les centres de stockage de déchets.

2 Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire.

LES MATIÈRES RADIOACTIVES

L'URANIUM NATUREL EXTRAIT DE LA MINE

L'uranium se présente à l'état naturel sous la forme d'un métal gris très dense. Il est composé de trois isotopes radioactifs : l'uranium 238 (99,3 %), l'uranium 235 (0,7 %, seul isotope naturel fissile) et l'uranium 234 (traces). L'uranium est extrait de mines. En France, les mines d'uranium ont été exploitées jusqu'en 2001. Aujourd'hui, l'approvisionnement de l'uranium naturel extrait de la mine se fait exclusivement à l'international.

Il est ensuite traité et mis sous la forme d'un concentré solide d'uranium puis conditionné. En fonction du procédé de traitement utilisé, les concentrés peuvent être sous forme d'uranates, appelés *yellow cake*, ou d'oxydes d'uranium (U_3O_8). Les concentrés d'uranium sont transformés en tétrafluorure d'uranium (UF_4) puis en hexafluorure d'uranium (UF_6), gazeux à basse température : c'est l'étape de conversion de l'uranium.

C'est sous cette forme que l'uranium naturel est utilisé dans l'étape d'enrichissement en vue de fabriquer le combustible nucléaire.

L'URANIUM NATUREL ENRICHIS

L'enrichissement consiste à augmenter la concentration en uranium 235 (isotope énergétique trop faiblement présent – teneur de 0,7 % – dans l'uranium naturel extrait de la mine) de façon à obtenir une matière utilisable comme combustible dans les réacteurs électronucléaires à eau sous pression.

Le procédé d'enrichissement mis en œuvre dans l'usine Georges-Besse II d'Orano sur le site de Tricastin depuis 2011 est celui de la centrifugation. Le gaz UF_6 est introduit dans le

cylindre tournant à très haute vitesse, sous vide, dans un carter étanche. Les molécules les plus lourdes, sous l'effet de la force centrifuge, sont envoyées à la périphérie du tube tandis que les plus légères uranium 235 migrent vers le centre. Le gaz enrichi en isotope léger uranium 235, au centre du tube, monte. Le gaz enrichi en uranium 238, plus lourd, descend. Les produits enrichis et appauvris sont récupérés aux deux extrémités, haute et basse, du tube. Cette étape élémentaire de séparation des molécules est répétée au sein d'un ensemble de centrifugeuses mises en série, appelé cascades.

L'uranium enrichi utilisé pour la production d'électricité comprend de l'uranium 235 à une teneur d'environ 4 %. Après enrichissement, l'uranium qui se trouve sous la forme gazeuse UF_6 est converti en dioxyde d'uranium (UO_2) puis compacté sous forme de pastilles utilisées dans la fabrication des combustibles.

L'URANIUM APPAUVRI (U_{APP})

L'enrichissement permet d'obtenir de l'uranium enrichi en uranium 235 d'une part et de l'uranium appauvri d'autre part. L'uranium appauvri en uranium 235 (isotope présent avec une teneur de l'ordre de 0,3 %) est transformé en une matière solide, stable, incombustible, insoluble et non corrosive : l'oxyde d'uranium (U_3O_8), qui se présente sous la forme d'une poudre noire.

L'uranium appauvri est utilisé régulièrement depuis plusieurs années comme matrice support du combustible MOX, élaboré en France dans l'usine Melox située à Marcoule. Ce flux représente environ une centaine de tonnes par an.

VALORISATION DE L'URANIUM APPAUVRI

Le stock d'uranium appauvri actuellement présent sur le territoire national représente, une fois ré-enrichi, un gisement d'environ 60 000 tonnes d'uranium naturel, soit environ huit années des besoins du parc électronucléaire français actuel. Le ré-enrichissement peut être pratiqué pour une utilisation comme combustible UNE. L'uranium appauvri, en particulier celui issu d'un second cycle d'enrichissement, pourrait permettre de répondre à plus long terme aux besoins du parc mondial de réacteurs de génération IV.

L'uranium appauvri présente, outre son potentiel énergétique, de nombreuses propriétés particulièrement intéressantes

dont certaines ont déjà été exploitées dans des secteurs non-électronucléaires. La valorisation de l'uranium par l'exploitation de ces propriétés fait l'objet d'un programme de R&D mené par Orano.

Ces perspectives de valorisation présentent toutefois des incertitudes selon l'ASN. Une étude de faisabilité d'un concept de stockage pour l'uranium appauvri est menée par l'Andra pour le cas où le stock d'uranium appauvri ou une partie de celui-ci ne serait pas valorisable dans des conditions technico-économiques acceptables.

L'URANIUM ISSU DU RETRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS (URT)

L'uranium extrait des combustibles usés (URT) dans les usines de retraitement constitue environ 95 % de la masse du combustible usé et contient toujours une part significative d'isotope 235. L'enrichissement résiduel en uranium 235 est de l'ordre de 0,7 % à 0,8 % pour des combustibles REP avec des taux de combustion de 45 à 55 GWj/t. L'URT est entreposé sous forme d' U_3O_8 .

Pour être réutilisé dans des réacteurs à eau sous pression, tels que ceux exploités actuellement par EDF, un enrichissement est nécessaire.

L'URANIUM ENRICHI ISSU DU RETRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS

L'uranium issu du retraitement des combustibles usés (URT) contient encore une part d'isotope 235 malgré une composition isotopique plus complexe que l'uranium naturel due notamment à la présence d'uranium 234 et 236. Il peut donc par la suite être enrichi. La présence d'uranium 236, absorbant neutronique agissant comme un poison à la fission nucléaire, impose d'enrichir à

des teneurs supérieures à celles nécessaires pour l'uranium naturel, de manière à compenser la perte de réactivité. L'uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés peut être utilisé pour fabriquer du combustible à base d'uranium de retraitement enrichi (URE). Comme pour l'uranium naturel, la centrifugation est utilisable pour enrichir l'uranium issu du retraitement des combustibles usés.

L'approvisionnement en assemblages de combustible à l'uranium de retraitement enrichi pour les réacteurs EDF étant pour le moment interrompu dans l'attente d'une filière industrielle optimisée, aucun stock d'uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés n'est disponible en France.

LE THORIUM

Le thorium se présente principalement sous la forme d'hydroxyde de thorium ou de nitrate de thorium. Dans le cadre de ses activités de traitement de minerai de terres rares, la société Solvay a produit :

- entre 1970 et 1987, un composé issu du traitement en voie chlorure de la monazite : l'hydroxyde brut de thorium (HBTh), potentiellement valorisable (*voir encadré ci-après*) ;
- jusqu'en 1994, du nitrate de thorium, issu du traitement en voie nitrate de la monazite.

EXEMPLE D'UTILISATION DE MATIÈRES THORIFÈRES PAR ORANO MED

Orano Med est la filiale médicale d'Orano. Créée en 2009, elle concentre ses activités sur le développement de nouvelles thérapies ciblées de lutte contre le cancer, *via* l'utilisation du plomb 212.

Le plomb 212 est un isotope rare issu de la chaîne de décroissance du thorium 232. Cet élément, émetteur de rayonnement alpha, est aujourd'hui au cœur de projets de recherche en médecine nucléaire pour la mise au point de nouveaux traitements contre le cancer.

Orano Med a développé un procédé permettant l'extraction du plomb 212, qui est aujourd'hui mis en œuvre dans le laboratoire Maurice-Tubiana. Le champ thérapeutique dans lequel intervient Orano Med est appelé alphathérapie, ou radio-immunothérapie alpha lorsque le plomb 212 est associé à l'utilisation d'un anticorps permettant de reconnaître et de détruire les cellules cancéreuses, en limitant l'impact sur les cellules saines environnantes. Des essais cliniques et précliniques ont été initiés respectivement aux États-Unis et en France.

L'alphathérapie est connue depuis plusieurs années, mais le développement des traitements s'est heurté à la rareté des isotopes émetteurs alpha, et aux difficultés techniques de production et de purification de ces isotopes pour des usages médicaux. Orano disposant d'une source de nitrate de thorium principalement constitué de thorium 232, Orano Med en conduit la valorisation pour assurer une production du plomb 212 compatible avec les besoins de développement de nouveaux traitements sur le long terme.

L'ASN considère que cette utilisation de plomb 212 ne modifie toutefois pas les quantités détenues de substances thorifères ni leur radiotoxicité. Une étude de faisabilité d'un concept de stockage pour substances thorifères est menée par l'Andra vis-à-vis du stock existant.

LES MATIÈRES EN SUSPENSION (MES)

Les matières en suspension issues du traitement de neutralisation des effluents chimiques produits sur l'usine

de Solvay contiennent en moyenne 25 % d'oxydes de terres rares qui sont des sous-produits valorisables.

VALORISATION DES MATIÈRES EN SUSPENSION ET DE L'HYDROXYDE BRUT DE THORIUM

La valorisation de ces matières porte sur leur contenu en terres rares, en thorium et en uranium.

Les terres rares sont utilisées dans de nombreux produits de consommation courante comme les écrans plats, certaines batteries, fibres ou verres optiques, etc. Environ 10 000 tonnes d'oxydes de terres rares sont récupérables à partir du traitement des matières en suspension (MES) et de l'hydroxyde brut de thorium (HBTh). Le thorium pourrait être valorisable dans des

applications nucléaires dans un « cycle thorium. » De même, des pistes sont envisagées pour valoriser le thorium dans des secteurs non électronucléaires.

Ces perspectives de valorisation présentent toutefois des incertitudes, qui ont conduit l'ASN à considérer, dans son avis du 9 février 2016¹, que la sécurisation du financement de la gestion à long terme des substances thorifères est indispensable.

LES COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES

Plusieurs types de combustibles nucléaires sont ou ont été utilisés en France.

Les combustibles à l'uranium naturel enrichi (UNE) sont composés de crayons combustibles contenant des pastilles d' UO_2 eux-mêmes regroupés en assemblages combustibles. Il s'agit des combustibles utilisés majoritairement par EDF.

Les combustibles à l'uranium de retraitement enrichi (URE) sont composés d'uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés. Ces combustibles sont autorisés dans quatre réacteurs électronucléaires.

Les combustibles mixte uranium-plutonium (MOX) sont composés d'uranium appauvri et de plutonium provenant du retraitement des combustibles usés UNE sous forme de pastilles de poudre d'oxydes (U, Pu) O_2 . Les combustibles MOX sont fabriqués à l'usine de Melox à Marcoule et sont autorisés aujourd'hui dans 24 réacteurs REP.

Les combustibles des réacteurs à neutrons rapides Phénix et Superphénix (RNR) à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium qui ont été mis à l'arrêt définitif et ne sont donc plus utilisés.

Les combustibles du CEA civil sont utilisés dans des réacteurs particuliers à des fins de recherche. Ils peuvent également servir à la production de radioéléments pour la médecine nucléaire et l'industrie non-électronucléaire. Ceux-ci sont plus variés en termes de forme et de composition physico-chimique que les combustibles EDF, ils sont aussi beaucoup moins nombreux. Il peut s'agir de combustibles de type oxyde, métallique, hydrure, etc.

Les combustibles de la défense nationale utilisés soit dans les réacteurs destinés à la fabrication de matière pour la force de dissuasion, soit dans les réacteurs embarqués des sous-marins, des navires et leurs prototypes à terre.

Pour l'ensemble de ces combustibles, il existe à tout moment des stocks de combustibles avant utilisation, en cours d'utilisation ou usés.

Les combustibles neufs sont transportés dans des emballages adaptés, par voie routière ou ferroviaire, de l'usine de fabrication de combustible vers les centres nucléaires de production. Dès leur arrivée sur site, ils sont entreposés dans le bâtiment combustible en attente de mise en réacteur.

Les combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs électronucléaires y séjournent pendant trois à quatre ans. Puis, du fait de leur baisse de performances, ils sont retirés et entreposés dans une piscine de refroidissement à proximité du réacteur avant d'être dirigés vers l'usine de retraitement de La Hague dans laquelle les combustibles à l'uranium naturel enrichi sont retraités.

À noter que la qualification en tant que matière radioactive d'une substance peut être la conséquence d'une décision de l'État (c'est par exemple le cas des combustibles usés de manière générique) ou d'une décision de son propriétaire. Dans ce dernier cas, l'autorité de contrôle peut s'opposer à cette qualification et demander un classement en tant que déchet radioactif.

La stratégie nationale actuelle consiste à retraiter les combustibles UNE usés.



Un assemblage combustible est un ensemble de crayons maintenus par des grilles de support.

Ces crayons sont des longs tubes en alliage de zirconium qui contiennent des pastilles d'oxyde d'uranium empilées constituant le combustible. Un réacteur électronucléaire contient plusieurs assemblages combustibles.

La paroi ou gaine de ces crayons et leurs embouts assurent le confinement des produits radioactifs par rapport à l'eau sous haute pression et à température élevée.

¹ Avis n° 2016-AV-0256 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 9 février 2016 sur les études relatives à l'évaluation du caractère valorisable des matières radioactives remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.

LE PLUTONIUM ISSU DES COMBUSTIBLES USÉS APRÈS RETRAITEMENT

Le plutonium contenu dans les assemblages combustibles usés UNE est extrait de ceux-ci lors de leur retraitement. Un combustible usé à l'uranium de type eau légère contient environ 1 % de plutonium (en masse). Ce plutonium présente un potentiel énergétique.

Une fois mis en solution, extrait et séparé des autres matières contenues dans le combustible usé, le plutonium est purifié et conditionné sous forme stable de poudre d'oxyde de plutonium (PuO_2) dans les ateliers R4 et T4 de l'usine de La Hague.

Le plutonium est aujourd'hui utilisé pour fabriquer le combustible MOX.

Le plutonium extrait des combustibles usés appartient aux clients d'Orano, électriciens français ou étrangers. En général,

le plutonium est expédié aux clients étrangers sous forme de combustible MOX, pour être utilisé dans leurs réacteurs.

LES REBUTS DE COMBUSTIBLES

Les rebuts de combustibles non irradiés en attente de retraitement ont vocation à être retraités et recyclés à terme dans les réacteurs électronucléaires.

AUTRES MATIÈRES

Le cœur neuf de Superphénix est le combustible qui devait remplacer à terme le combustible utilisé pendant le fonctionnement de la centrale. En raison de l'arrêt définitif de Superphénix, cette recharge de combustible n'a jamais été utilisée et n'a donc pas été irradiée.

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA GESTION DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

LA POLITIQUE DE GESTION

Les principes de gestion des déchets radioactifs s'inscrivent dans un cadre réglementaire strict, défini aux niveaux national et international. En outre, la France est signataire de la Convention commune sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs et des combustibles usés, établie sous l'égide de l'AIEA¹, qui définit des principes de gestion.

AU NIVEAU EUROPÉEN

Le Conseil de l'Union européenne a adopté une directive le 19 juillet 2011² établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs depuis leur production jusqu'à leur stockage.

Cette directive couvre toutes les étapes de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs résultant d'activités civiles. Chaque État membre est responsable en dernier ressort de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs produits sur son territoire.

La directive prévoit que chaque État membre établisse et maintienne un cadre prévoyant l'élaboration de programmes nationaux pour la gestion du combustible usé et des déchets, l'octroi d'autorisations, la réalisation d'inventaires, de mesures de contrôle et d'inspections, de mesures d'exécution telle que la suspension de l'exploitation, la répartition des responsabilités, l'information et la participation du public et le financement de la gestion des déchets. En outre, la directive prévoit que chaque

État membre institue et maintienne en place une autorité de réglementation compétente pour la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, certaines conditions étant fixées pour garantir son indépendance.

AU NIVEAU NATIONAL

La France a défini et mis en œuvre une politique publique en matière de déchets radioactifs, dans un cadre législatif établi en 1991 (loi du 30 décembre 1991³) et consolidé en 2006 (loi du 28 juin 2006). Ces textes sont codifiés dans le Code de l'environnement.

Conduite par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) au sein du ministère de la Transition écologique et solidaire, cette politique comporte trois piliers :

- un Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR)⁴, mis à jour tous les trois ans par l'État et fixant un programme de recherches et de réalisations, assorti d'un calendrier ;
- des dispositions en matière d'évaluation indépendante des recherches, d'information du public et de dialogue avec l'ensemble des parties prenantes ;
- la garantie de la disponibilité des financements nécessaires : en vertu de l'article L. 110-1 du Code de l'environnement, selon lequel « les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur », c'est au producteur du déchet d'en financer la gestion, y compris à long terme.

1 Joint Convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management, disponible sur : <http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.asp>.

2 Directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs.

3 Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs.

4 PNGMDR (Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs), disponible sur le site ecologie-solidaire.gouv.fr.

LA LOI FRANÇAISE

L'article L. 541-1 du Code de l'environnement pose comme principes la prévention ou la réduction de la production de déchets, la responsabilité des producteurs jusqu'à l'élimination de leurs déchets, la traçabilité et la nécessité d'informer le public.

Le Code de l'environnement indique que « 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 » (*article L. 542-1*).

De nombreuses dispositions sont mises en œuvre pour respecter ce cadre législatif :

- des prescriptions concernant le traitement et le conditionnement, le transport et les installations : elles sont définies par les autorités compétentes, qui en contrôlent ensuite l'application ;
- des modalités pour réduire le volume et la nocivité des déchets ; pour les déchets produits, des opérations de tri, de traitement, de conditionnement et de caractérisation du contenu radiologique : elles sont définies et mises en œuvre par les producteurs de déchets. Des études de recherche et développement sont souvent nécessaires et sont menées par différents organismes, en particulier par le CEA ;
- la conception et la réalisation d'installations d'accueil avec le niveau de sûreté requis. Il s'agit soit d'entreposage (solution temporaire) qui relève en général de la responsabilité des producteurs de déchets, soit de stockage (solution définitive) dont la responsabilité incombe à l'Andra (*voir dossier thématique 1*) ;
- des opérations de transport et de mise en entreposage ou en stockage, incluant les aspects de suivi et de surveillance, y compris à long terme pour les stockages ;
- des dispositions destinées à informer le public.

LE CONTRÔLE DES MATIÈRES NUCLÉAIRES

Compte tenu de son industrie nucléaire et consciente de ses responsabilités en matière de non-prolifération, la France s'est dotée d'une réglementation et d'une organisation dans le contrôle des matières nucléaires. Cette réglementation porte aussi bien sur les matières civiles que sur celles relevant de la défense nationale.

Sur le plan national, la protection et le contrôle des matières nucléaires font l'objet d'une réglementation spécifique qui relève du Code de la défense et des textes réglementaires associés.

Les matières nucléaires retenues dans la législation française sont au nombre de six : le plutonium, l'uranium, le thorium, le tritium, le deutérium et le lithium 6 (*article R. 1333-1 du Code de la défense, le deutérium et le lithium 6 ne sont pas radioactifs*). Leur définition fait l'objet d'examen périodiques en fonction du développement des connaissances et des techniques. Seuls le plutonium, l'uranium et le thorium sont considérés dans l'Inventaire national.

Cette réglementation vise à prévenir les risques de perte, de vol ou de détournement de matières nucléaires, ainsi qu'à protéger ces matières et les installations ou transports associés contre les actes de malveillance.

Dans ce cadre, la réglementation impose aux opérateurs et aux industriels détenant ces matières un certain nombre de dispositions qui se complètent mutuellement, telles que :

- des mesures de protection physique pour protéger les matières contre la malveillance et le sabotage par la mise en place de barrières et autres dispositifs entre le domaine public et les locaux où sont détenues les matières ;
- des mesures de suivi des matières qui permettent de connaître à tout moment la localisation et l'usage des matières ;
- des mesures de comptabilité afin de connaître à tout moment les quantités exactes de matières détenues. Chaque opérateur doit détenir sa propre comptabilité matière qui est comparée régulièrement à une comptabilité centralisée tenue par l'IRSN. Par exemple pour le plutonium et l'uranium, la comptabilité est tenue au gramme près ;
- des mesures de confinement pour prévenir les mouvements de matières non autorisés ;
- des mesures de surveillance qui ont pour but de garantir l'intégrité du confinement et de vérification de l'absence de sortie de matières par des voies illicites.

La détention des matières par un opérateur nécessite une autorisation préalable par l'autorité compétente qui est en France le haut fonctionnaire de défense et de sécurité du ministère en charge de l'énergie. Cette autorisation n'est délivrée qu'après analyse d'un dossier fourni par l'opérateur en matière de protection physique, suivi, comptabilité, etc. Cette analyse est effectuée par l'IRSN qui agit en support à l'autorité ministérielle.

L'attribution de l'autorisation nécessite la réalisation par l'opérateur d'une étude de sécurité visant à évaluer l'efficacité et la pertinence du dispositif de protection à l'égard de menaces de référence définies par les pouvoirs publics. Les menaces sont réévaluées périodiquement par les services spécialisés de l'État pour tenir compte de l'évolution du contexte national et international.

Sur le plan international, les contrôles du respect de l'accord du traité de non-prolifération et du traité Euratom sont exercés respectivement par l'AIEA et par les services de la Commission européenne. Ces contrôles portent d'une part sur la déclaration et le suivi des mouvements de matières nucléaires (plutonium, uranium et thorium) entre pays, d'autre part sur les déclarations de flux et de stocks de matières détenues au niveau national pour les matières nucléaires qui ne relèvent pas des matières affectées au besoin de la défense nationale. Ces contrôles internationaux se traduisent sur les installations françaises par des inspections menées par des inspecteurs d'Euratom et dans une moindre mesure de l'AIEA (accord trilatéral entre l'AIEA, Euratom et la France).

LES ACTEURS DE LA GESTION DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

LE CADRE INSTITUTIONNEL

Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) s'appuie sur les données de l'Inventaire national pour dresser le bilan des modes de gestion existants, recenser les besoins prévisibles d'installations d'entreposage ou de stockage et déterminer les objectifs à atteindre pour les déchets radioactifs qui ne font pas encore l'objet d'un mode de gestion définitif, ainsi que sur les travaux d'un groupe de travail pluraliste, co-présidé par l'ASN et la DGEC, constitué de représentants de l'administration, des autorités de sûreté, des gestionnaires de déchets radioactifs, des producteurs de déchets, et de représentants d'associations de protection de l'environnement.

Au sein du ministère en charge de l'écologie :

- la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) a en charge l'élaboration de la politique et la mise en œuvre des décisions du gouvernement relatives au secteur nucléaire civil ;
- la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), et en particulier la mission sûreté nucléaire et radioprotection (MSNR) élabore, coordonne et met en œuvre les missions du gouvernement concernant la sûreté nucléaire et la radioprotection civile, à l'exclusion des missions confiées à l'ASN. Cette mission assure aussi, en lien avec l'ASN, le suivi des questions relatives à la gestion des anciennes mines d'uranium (*voir chapitre 4*) et des sites et sols pollués par des substances radioactives (*voir dossier thématique 4*). La DGPR élabore également la politique en matière de gestion des déchets conventionnels, y compris ceux dits à radioactivité naturelle élevée (*NORM – voir chapitre 4*).

Sur les questions scientifiques de manière générale, et notamment celles relatives aux programmes nucléaires, le Parlement s'est doté d'un organisme d'évaluation propre : l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST). Cet organisme auditionne les acteurs de la gestion des matières et des déchets radioactifs et publie des rapports d'évaluation et des recommandations, consultables sur senat.fr/opecest.

Le Parlement s'appuie sur la Commission nationale d'évaluation (CNE) qui est chargée d'évaluer annuellement l'état d'avancement et la qualité des recherches sur la gestion des matières et des déchets radioactifs. Cette commission a été créée par la loi du 30 décembre 1991, et confirmée par l'article L. 542-3 du Code de l'environnement. La Commission publie annuellement un rapport qui est transmis au Parlement et rendu public, disponible sur cne2.fr.

La Commission nationale d'évaluation du financement (CNEF) des charges de démantèlement des installations nucléaires de base et de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs est une commission créée par la loi du 28 juin 2006, afin de contrôler le financement des charges nucléaires de long terme.

Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) est une instance d'information, de concertation et de débat sur les risques liés aux activités nucléaires et l'impact de ces activités sur la santé des personnes, sur l'environnement et sur la sécurité nucléaire, créée par la loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (loi TSN)¹. Ses missions sont aujourd'hui précisées à l'article L. 125-34 du Code de l'environnement. Les comptes rendus et recommandations du HCTISN sont consultables sur hctisn.fr.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), créée par la loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (loi TSN), est une autorité administrative indépendante dont les missions sont aujourd'hui précisées à l'article L. 592-1 du Code de l'environnement :

- elle assure, au nom de l'État, le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection. Elle contrôle les producteurs de déchets et l'Andra dans leurs activités nucléaires ou qui nécessitent des mesures de radioprotection ;
- elle instruit également les procédures d'autorisation des installations nucléaires de base (INB) ;
- elle autorise à titre individuel la détention de certaines sources radioactives ou équipements utilisant des rayonnements ionisants ;
- elle s'appuie sur l'expertise de l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire (IRSN).

L'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ASND) assure le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense. Comme l'ASN, elle s'appuie sur l'expertise de l'IRSN.

LES PRODUCTEURS DE DÉCHETS RADIOACTIFS

Conformément à l'article L. 542-1 du Code de l'environnement, les producteurs de déchets radioactifs sont responsables de la bonne gestion de leurs déchets avant leur évacuation vers un exutoire définitif. En particulier, ils doivent trier et définir les modes de traitement et de conditionnement des déchets, en fonction des technologies disponibles, dans l'objectif de réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs.

Ils opèrent le conditionnement des déchets, sous des procédures strictes d'assurance qualité requises par la réglementation². Ils assurent l'entreposage des déchets qui n'ont pas d'exutoire définitif à ce jour.

1 Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire.

2 Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base.

Ils sont en outre responsables du transport des déchets conditionnés jusqu'aux centres de stockage de l'Andra.

Pour certains producteurs ne disposant pas des moyens adéquats, du fait du faible volume de déchets qu'ils produisent, tels que les laboratoires de recherche hors CEA ou les hôpitaux, l'Andra peut assurer également la collecte, le traitement, le conditionnement et l'entreposage des déchets.

LES DÉTENTEURS DE MATIÈRES RADIOACTIVES

Les principaux détenteurs de matières radioactives sont les suivants :

- Orano intervient sur l'ensemble du cycle du combustible hormis l'utilisation des combustibles nucléaires. Ce cycle passe par l'extraction de l'uranium, sa concentration, sa conversion, son enrichissement, la fabrication de combustible puis le retraitement du combustible usé ;
- le CEA civil effectue de la recherche dans le domaine du nucléaire. Il utilise le combustible dans ses réacteurs à des fins de recherche ;
- EDF produit de l'électricité en utilisant du combustible dans ses réacteurs électronucléaires ;
- Solvay extrait des terres rares à partir de minerais contenant du thorium ;
- la défense nationale travaille pour la force de dissuasion et utilise des combustibles pour ses activités de propulsion navale.

LE RÔLE DE L'ANDRA

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) est chargée de la gestion à long terme des déchets radioactifs français.

C'est un Établissement public à caractère industriel et commercial (Épic) dont le rôle a été successivement défini par deux lois :

- loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. Cette loi a créé l'Agence en tant qu'établissement public, en lui confiant notamment les recherches sur le stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue ;
- loi de programme du 28 juin 2006 codifiée dans le Code de l'environnement relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Cette loi élargit et renforce le rôle de l'Agence et ses domaines d'activité.

Placée sous la tutelle des ministères en charge de l'énergie, de l'environnement et de la recherche, l'Andra est l'opérateur de l'État pour la mise en œuvre de la politique publique de gestion des déchets radioactifs. Elle est indépendante des producteurs de déchets radioactifs.

L'État fixe les objectifs de l'Andra au travers d'un contrat d'objectifs. Sa dernière version couvre la période 2017-2021. Il est disponible sur le site internet de l'Andra (andra.fr).

L'Andra met son expertise et son savoir-faire au service de l'État pour concevoir des solutions de gestion et exploiter des centres de stockage pour l'ensemble des déchets radioactifs produits en France, en protégeant à long terme la santé et l'environnement de l'impact de ces déchets.

Le Code de l'environnement précise les missions de l'Andra :

- mission de conception, de recherche scientifique et de développement technologique :
 - concevoir et mettre en œuvre des solutions de gestion pérennes pour les déchets de haute activité (HA), de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et de faible activité à vie longue (FA-VL) qui sont actuellement entreposés ;
- missions industrielles :
 - prendre en charge les déchets radioactifs issus du secteur électronucléaire, de la recherche, de la défense nationale, de l'industrie non-électronucléaire et du médical,
 - exploiter des centres de stockage de déchets radioactifs de façon sûre pour la santé et l'environnement ;
- missions d'intérêt général :
 - collecter les objets radioactifs auprès des particuliers et des collectivités locales,
 - assainir et remettre en état les sites pollués par la radioactivité, dont les propriétaires ont disparu ou sont défaillants (*voir dossier thématique 4*),
 - **réaliser l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs en France. Les stocks de matières et déchets radioactifs sont publiés tous les ans et les estimations prospectives tous les trois ans,**
 - fournir une information claire et vérifiable sur la gestion des déchets radioactifs,
 - favoriser les rencontres et susciter le dialogue avec toutes les parties prenantes ;
- missions de valorisation des savoir-faire en France et à l'international :
 - développer les collaborations scientifiques aux niveaux national et international,
 - valoriser l'ensemble des offres de service de l'Agence en France et à l'international,
 - diffuser le plus largement possible la culture scientifique et technique.





BILAN DES STOCKS À FIN 2016

BILAN DES STOCKS PAR CATÉGORIE À FIN 2016	27
Les déchets radioactifs	27
Les matières radioactives	34
BILAN DES STOCKS PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE	37
Secteur électronucléaire	38
Secteur de la recherche	46
Secteur de la défense	49
Secteur de l'industrie non-électronucléaire	51
Secteur médical	53

Dans tout le chapitre, les quantités sont arrondies et les écarts sont calculés sur la base des chiffres exacts puis arrondis.

Ce chapitre présente les bilans des déclarations des stocks faites par les producteurs ou détenteurs de matières et déchets radioactifs durant l'année 2017. Conformément au décret n° 2008-875 du 29 août 2008 et à l'arrêté du 9 octobre 2008 modifié, ces déclarations portent sur les stocks de matières et déchets radioactifs présents sur les sites au 31 décembre 2016.

Au total, près de 1 000 sites géographiques au sens de l'Inventaire national (*voir annexe 1*) sur lesquels se trouvent des matières et déchets radioactifs à fin 2016 sont répertoriés dans l'édition 2018. Le détail des sites recensés se trouve sur le site inventaire.andra.fr.

Si la majorité des déchets radioactifs provient de l'industrie électronucléaire et des activités de recherche associées, de nombreux autres secteurs sont également à l'origine de la production de déchets radioactifs, comme l'industrie non-électronucléaire, la défense, la recherche en dehors de l'électronucléaire ou le médical. Ces producteurs ne représentent, malgré leur multiplicité, qu'une fraction réduite du volume de déchets présents en France.

Ce chapitre offre, dans une première partie, une vision globale quantitative des matières et déchets en stock à fin 2016 et dans une seconde partie pour chacun des secteurs économiques, les matières et déchets radioactifs répertoriés au 31 décembre 2016.

► LE PÉRIMÈTRE DES DÉCHETS PRIS EN COMPTE DANS LES BILANS

Les déchets pris en compte pour les bilans du présent chapitre ne tiennent pas compte des déchets faisant l'objet de modes de gestion « spécifiques » (*voir chapitre 4*). Il s'agit :

- des résidus de traitement de minerais d'uranium qui sont stockés sur certains anciens sites miniers. L'Inventaire national recense 19 sites sur lesquels sont entreposés sur place et de façon définitive ces résidus ;
- des déchets en situation historique qui ont pu être stockés au sein ou à proximité d'installations nucléaires, dans les installations de stockage de déchets conventionnels, dans des dépôts historiques ou encore faire l'objet d'une immersion en mer.

Par ailleurs, ne sont pas quantifiés dans les bilans :

- les substances radioactives se trouvant sur des sites pollués ayant accueilli des activités manipulant la radioactivité (*voir dossier thématique 4*) ;
- les déchets à vie très courte (VTC) qui sont gérés en décroissance sur place avant évacuation dans des filières conventionnelles. Ils ne sont donc pas envoyés dans un stockage dédié aux déchets radioactifs ;
- les résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU) provenant de l'usine d'Orano à Malvési qui sont affichés séparément : en effet, Orano a transmis en 2014 et 2015, au titre du PNGMDR, des études sur la gestion à long terme de ces déchets, qui sont notamment entreposés dans des bassins de décantation et d'évaporation, et ne sont pas conditionnés. Des études sont toujours en cours. Dans l'attente d'une décision, ces déchets sont présentés séparément dans les bilans chiffrés des stocks de déchets existants au 31 décembre 2016.

Ces exclusions concernent l'ensemble des bilans présentés dans les chapitres 2 et 3. Elles ne seront plus mentionnées par la suite.

BILAN DES STOCKS PAR CATÉGORIE À FIN 2016

LES DÉCHETS RADIOACTIFS

Les déchets radioactifs sont définis dans l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement comme « des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée ou qui ont été requalifiées comme tels par l'autorité administrative en application de l'article L. 542-13-2. 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. »

VOLUMES DE DÉCHETS RADIOACTIFS À FIN 2016

Le volume de déchets radioactifs recensé depuis le début de leur production jusqu'au 31 décembre 2016 est de 1 540 000 m³ environ (volume équivalent conditionné) soit environ 85 000 m³ de plus qu'au 31 décembre 2013.

L'UNITÉ DE VOLUME UTILISÉE

L'unité adoptée pour effectuer les bilans est le « volume équivalent conditionné. » Cela permet d'utiliser une unité de compte homogène pour l'ensemble des déchets.

Les volumes de déchets recensés correspondent aux volumes de déchets conditionnés, c'est-à-dire pour lesquels aucun traitement complémentaire n'est envisagé par leurs producteurs avant stockage. Les déchets ainsi conditionnés constituent des colis primaires.

Pour les déchets dont le conditionnement n'est pas connu à ce jour, des hypothèses sont faites pour évaluer le volume

équivalent conditionné correspondant au colis primaire envisagé selon les hypothèses à date.

Un conditionnement complémentaire au colis primaire appelé colis de stockage sera éventuellement nécessaire afin d'assurer des fonctions de manutention et de récupérabilité. Ce volume n'est pas considéré dans le « volume équivalent conditionné. » Par exemple, au stade actuel des études de conception du projet Cigéo, le volume des colis de stockage des déchets HA pourrait être deux à trois fois plus important que celui des colis primaires, et celui des déchets MA-VL trois à six fois plus important.

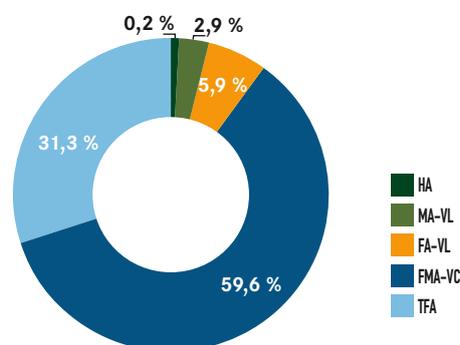
Les volumes de déchets radioactifs présents sur le territoire français au 31 décembre 2016, y compris les déchets étrangers destinés à repartir dans leur pays (voir encadré « déchets étrangers » page 29), sont présentés dans le tableau et le graphique ci-après. Dans le tableau, ces volumes sont comparés à ceux présents à fin 2013 (édition 2015 de l'Inventaire national).

► BILAN ET ÉVOLUTION DES DÉCHETS PAR CATÉGORIE

Catégorie	Volume à fin 2016 (m ³)	Écart 2016/2013 (m ³)
HA	3 650	+ 440
MA-VL	45 000	+ 1 260
FA-VL	90 500	- 570
FMA-VC	917 000	+ 39 600
TFA	482 000	+ 46 200
DSF*	1 800	- 1 970
Total	~ 1 540 000	~ + 85 000

* Les déchets sans filière représentent un peu moins de 0,1 % du volume total de déchets et ne sont pas repris dans le graphique suivant.

► RÉPARTITION EN VOLUME PAR CATÉGORIE DE DÉCHETS



DÉCHETS DE MALVÉSI

Le site industriel Orano de Malvési (Narbonne) opère depuis 1960 la première étape de la conversion nécessaire au cycle du combustible nucléaire. Il constitue l'unique point d'entrée en France de l'uranium naturel provenant des mines, et procède à leur purification et à leur transformation en tétrafluorure d'uranium (UF₄). Les effluents liquides issus du procédé sont neutralisés à la chaux puis dirigés vers les bassins de décantation où s'effectue une séparation solide-liquide. Les bassins de décantation se remplissent donc au fur et à mesure de la fraction solide des effluents (boues de fluorine et d'hydroxydes métalliques) constituant les déchets solides du procédé de conversion. La fraction liquide des effluents (liquides nitrates), clarifiée par la décantation, rejoint les bassins d'évaporation où elle est concentrée par évaporation naturelle.

Déchets de Malvési	Volume à fin 2016 (m ³) ¹
Boues des bassins de décantation	70 400
RTCU historiques	282 000
Effluents nitrates	374 000
Total	726 000

Les déchets provenant de l'usine d'Orano à Malvési sont affichés séparément dans les bilans chiffrés des stocks de déchets existants au 31 décembre 2016 et dans les prévisions dans l'attente d'une décision sur la gestion à long terme de ces déchets.

Les volumes présentés dans le tableau page 27 sont fondés sur un certain nombre d'hypothèses, détaillées dans les fiches familles disponibles sur Internet (inventaire.andra.fr). Les principales sont les suivantes :

- les hypothèses de conditionnement pour les déchets non conditionnés. Conformément à l'arrêté du 9 octobre 2008 modifié, les producteurs doivent déclarer « le volume équivalent de déchets conditionnés, y compris pour les déchets non conditionnés ou préconditionnés, selon la ou les hypothèses de conditionnement associées. » Les hypothèses retenues par les producteurs correspondent à la meilleure appréciation qu'ils possèdent au moment de la déclaration. Elles peuvent être en cours d'étude ou en cours de discussion avec l'Autorité de sûreté nucléaire ou l'Andra en vue du stockage ;
- les déchets des opérations de démantèlement sont comptabilisés si l'opération de démantèlement a effectivement eu lieu à la date du 31 décembre 2016. Pour cette raison, les déchets de graphite FA-VL qui sont encore dans les caissons des réacteurs UNGG (empilements, réflecteurs en place, aires de support) ne sont pas comptabilisés dans les stocks à fin 2016 mais sont pris en compte dans les prévisions de volumes

de déchets, en fonction de leur date de démantèlement prévisionnelle (*voir chapitre 3*) ;

Déchets de Malvési	Volume à fin 2016 (m ³)	Écart 2016/2013 (m ³)
Total	726 000	+ 33 000

L'augmentation du volume de déchets de l'usine d'Orano à Malvési est due à trois années supplémentaires de production.

Pour les déchets à produire à compter du 1^{er} janvier 2019, Orano travaille actuellement sur deux projets destinés, d'une part, à réduire le volume des déchets solides produits et à privilégier les filières de gestion existantes, et, d'autre part, à traiter (par un procédé thermique) les futurs effluents liquides de procédé, conjointement à ceux déjà entreposés dans les bassins d'évaporation. Ces évolutions à venir du procédé conduiraient à différencier deux familles de déchets à produire :

- des déchets solides, composés de fluorines et gypses, qui seront produits à l'avenir par l'usine sous forme de boues densifiées et entreposés en alvéoles sur le site ;
- des déchets solides issus du traitement thermique des effluents liquides nitrates qui seront produits par le fonctionnement à venir des installations de conversion, mais aussi par la reprise du stock déjà entreposé dans les bassins d'évaporation.

de déchets, en fonction de leur date de démantèlement prévisionnelle (*voir chapitre 3*) ;

- quand l'étude de la filière de gestion d'une famille particulière de déchets est encore en cours, cette famille est classée selon l'hypothèse retenue par le producteur. L'Andra vérifie le classement proposé. Le choix de catégorie ne préjuge pas de l'acceptation des déchets en centre de stockage ;
- les déchets étrangers visés à l'article L. 542-2-1 du Code de l'environnement et ayant vocation à être réexpédiés chez les clients étrangers sont comptabilisés avec les déchets présents sur le site de l'usine Orano de La Hague ;
- les sources usagées hors paratonnerres (sources scellées, détecteurs de fumée, crayons sources, grappes sources, etc.) font l'objet d'une famille particulière qui n'est pas rattachée aux filières de gestion de la classification des déchets, à l'exception de colis anciens entreposés à Cadarache (colis MA-VL « blocs sources »). Dans cette édition, aucun volume équivalent conditionné n'est affecté à ces sources, en raison de la variabilité des hypothèses de gestion et de conditionnement possibles à ce stade. Les paratonnerres sont affectés à deux familles de déchets de type FA-VL.

¹ Les quantités sont exprimées en volume brut.

MATIÈRES ET DÉCHETS ÉTRANGERS

La France a adopté le principe de l'interdiction du stockage en France de déchets radioactifs provenant de l'étranger. Ce principe a été introduit dans la loi dès 1991, compte tenu des activités industrielles de retraitement de combustibles nucléaires usés ou de déchets radioactifs, et a été réaffirmé et précisé par la loi du 28 juin 2006 codifiée dans le Code de l'environnement.

L'industrie nucléaire française a développé une technologie de retraitement des combustibles usés, en vue d'en retirer les matières valorisables (uranium et plutonium) pour d'autres utilisations électronucléaires et d'en séparer les déchets ultimes en vue de leur stockage.

Cette technologie, appliquée au cycle nucléaire français, a été ouverte par le CEA dès les années 1970 (par contrat) à des électriciens étrangers. À partir de 1977, le CEA, puis Cogema (devenu successivement Areva et maintenant Orano) ont inclus dans tous leurs contrats une clause permettant de renvoyer à

ces clients étrangers les déchets ultimes issus du retraitement de leurs combustibles.

Pour permettre le contrôle du respect de ces dispositions, les exploitants concernés doivent établir chaque année, conformément à l'article L. 542-2-1 du Code de l'environnement, un rapport faisant l'état des stocks et des flux de substances radioactives étrangères, ce rapport devant inclure un volet prospectif.

Ces rapports sont publics :

- Rapport CEA – *Informations relatives aux opérations portant sur des combustibles usés ou des déchets radioactifs en provenance de l'étranger* – Rapport 2017, juin 2017, disponible sur le site Internet du CEA : cea.fr ;
- Rapport Areva – *Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'Areva NC La Hague* – Rapport 2016, juin 2017, disponible sur le site Internet d'Orano : orano.group.

LES ÉVOLUTIONS DEPUIS L'ÉDITION 2015

Les écarts constatés entre les volumes de déchets existants à fin 2013 et ceux à fin 2016 sont non seulement dus à la production courante de déchets, mais également à d'autres évolutions dont les principales sont détaillées ci-après.

HA

LES DÉCHETS DE HAUTE ACTIVITÉ

L'évolution du stock de déchets HA à fin 2016 correspond majoritairement à la production courante de déchets résultant de la vitrification de solutions de produits de fission issues du retraitement des combustibles usés à l'usine Orano de La Hague.

MA-VL

LES DÉCHETS DE MOYENNE ACTIVITÉ À VIE LONGUE

Le volume du stock à fin 2016 a augmenté d'environ 1 260 m³ par rapport au stock à fin 2013 présenté dans l'édition 2015.

En plus de la production courante de déchets MA-VL, des évolutions mineures peuvent être relevées :

- le changement de l'hypothèse de conditionnement des déchets contaminés en émetteurs alpha provenant de l'usine Orano de La Hague. Orano étudie actuellement un procédé d'incinération/fusion/vitrification. Bien que la production de ces déchets soit toujours en cours, le changement d'hypothèses de conditionnement conduit à une diminution du volume total de cette famille de déchets sans pour autant qu'il n'y ait de diminution de la quantité de déchets radioactifs ;
- la recatégorisation de quelques colis d'enrobés bitumineux du CEA initialement MA-VL en FMA-VC en raison de leur contenu radioactif.

FA-VL

LES DÉCHETS DE FAIBLE ACTIVITÉ À VIE LONGUE

Le volume des déchets FA-VL a diminué de 570 m³ environ depuis la dernière édition de l'Inventaire national.

La production annuelle courante de déchets de cette catégorie étant de l'ordre de 700 m³, les raisons suivantes expliquent principalement cette diminution :

- la prise en compte d'un nouveau scénario de conditionnement pour les déchets de structure des combustibles UNGG de La Hague, en cohérence avec les études déchets transmises à l'ASN, induisant une diminution du volume total de cette famille (- 4 000 m³ environ). Cette évolution ne correspond toutefois pas à une diminution de la quantité de déchets radioactifs ;
- certaines résines échangeuses d'ions d'Orano La Hague, précédemment déclarées dans la catégorie FMA-VC, ont été recatégorisées en FA-VL (+ 1 200 m³ environ) ;
- la prise en compte de déchets de la défense (+ 1 300 m³ environ) ;
- le changement d'hypothèses de conditionnement pour les chemises en graphite entreposées sur le site EDF de Saint-Laurent-des-Eaux (+ 300 m³ environ).

FMA-VC

LES DÉCHETS DE FAIBLE ET MOYENNE ACTIVITÉ À VIE COURTE

L'augmentation du volume de déchets FMA-VC à fin 2016 s'explique en grande partie par trois années supplémentaires de fonctionnement du parc de réacteurs électronucléaires et par les opérations de démantèlement réalisées pendant cette période.

Des évolutions dans les hypothèses de conditionnement retenues par les producteurs de déchets sont observées et ont conduit à des modifications de volume équivalent conditionné. À titre d'exemple, les hypothèses sur le taux d'incorporation des déchets magnésiens de structure de combustibles du CEA ont été réévaluées, entraînant une augmentation du volume total de la famille.

TFA LES DÉCHETS DE TRÈS FAIBLE ACTIVITÉ

En comparaison avec les chiffres de fin 2013, on constate une augmentation du volume de déchets TFA d'environ 46 200 m³ à fin 2016, essentiellement due aux opérations de démantèlement.

► POUR LES DÉCHETS DSF (DÉCHETS SANS FILIÈRE)

La diminution du volume de déchets sans filière est due à l'identification d'une filière de gestion pour une partie des déchets sans filière, notamment les déchets amiantés, orientés vers les catégories TFA ou FMA-VC.

CONTENU RADIOLOGIQUE DES DÉCHETS RADIOACTIFS À FIN 2016

Les activités radiologiques au 31 décembre 2016 sont déclarées par les détenteurs.

En ce qui concerne les déchets TFA et FMA-VC, les producteurs déclarent l'activité des déchets présents sur leurs sites. L'Andra déclare l'activité des déchets présents dans ses centres de stockage.

Cette activité est estimée suivant une méthode fondée sur des mesures ou des évaluations par calcul.

Dans le cas des déchets HA, MA-VL et FA-VL, l'activité est mesurée lors de la production des colis de déchets. L'activité des déchets en attente de conditionnement est estimée par calcul ou sur la base d'analyses effectuées sur des prélèvements. Elles seront affinées lors de leur conditionnement.

L'activité totale déclarée par les producteurs est de l'ordre de 205 000 000 TBq.

Le tableau et le graphique synthétisent l'activité totale déclarée.

► ACTIVITÉS DÉCLARÉES AU 31 DÉCEMBRE 2016

Catégorie	Activité à fin 2016 (TBq soit 10 ¹² Bq)
HA	194 000 000
MA-VL	10 100 000
FA-VL	280 000
FMA-VC	52 000
TFA	300
Total	~ 205 000 000

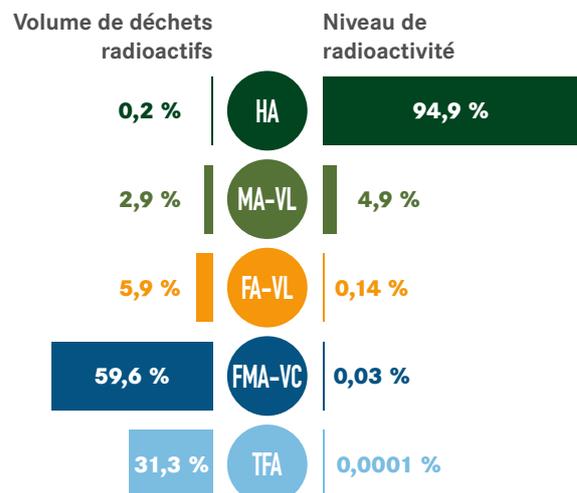
Les activités déclarées au 31 décembre 2016 mettent en évidence que :

- les déchets HA contiennent 94,9 % de l'activité totale des déchets radioactifs présents au 31 décembre 2016. Il s'agit des

déchets extraits des combustibles usés (produits de fission et actinides mineurs produits en réacteurs). Les principaux radionucléides contribuant à cette activité sont le césium 134, le césium 137 et son descendant métastable le baryum 137, le strontium 90 et son descendant l'yttrium 90 ;

- les déchets MA-VL représentent 4,9 % de la radioactivité totale. Les déchets activés des réacteurs et les déchets de structure des combustibles nucléaires [colis de coques et embouts compactés (CSD-C) et colis de coques et embouts cimentés] contribuent à près de 75 % de l'activité totale des déchets MA-VL. Les principaux radionucléides contenus dans les déchets activés sont le fer 55, le cobalt 60, le cadmium 109 et le tritium pour les émetteurs à vie courte, le nickel 63 et l'argent 108 métastable pour les émetteurs à vie longue. Dans le cas des déchets de structure de combustibles, les radionucléides les plus contributeurs à l'activité sont le fer 55, le strontium 90 et son descendant l'yttrium 90, le césium 137 et son descendant métastable le baryum 137, le tritium et le cobalt 60 pour les émetteurs à vie courte et le nickel 63 pour les émetteurs à vie longue ;
- les déchets FA-VL représentent 0,14 % de la radioactivité totale. Les déchets de graphite contiennent essentiellement du tritium et du cobalt 60 pour les émetteurs à vie courte, du carbone 14, du nickel 63, et en faible quantité, du chlore 36 pour les émetteurs à vie longue. Les déchets radifères contiennent essentiellement des radionucléides d'origine naturelle émetteurs alpha (radium, uranium, thorium, etc.) ;
- les déchets FMA-VC représentent 0,03 % de la radioactivité totale. Les colis de déchets solides produits par le CEA et par Orano La Hague ainsi que les colis de résines échangeuses d'ions d'EDF sont pour la plupart des familles de déchets contribuant le plus à l'activité de l'inventaire FMA-VC ;
- les déchets TFA représentent 0,0001 % de la radioactivité totale.

► RÉPARTITION DU VOLUME ET DES NIVEAUX DE RADIOACTIVITÉ DES STOCKS DE DÉCHETS À FIN 2016



ENTREPOSAGE DES DÉCHETS RADIOACTIFS



L'entreposage des déchets radioactifs est défini à l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement 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. »

Les déchets sont entreposés sur les sites dans des installations dédiées à cet effet. Il s'agit :

- pour les déchets à destination des centres de stockage existants :
 - d'entreposages tampon de déchets conditionnés sous forme de colis, à caractère logistique, permettant de gérer les flux vers les installations de l'Andra,
 - d'entreposages de déchets, notamment anciens, en attente de traitement, de conditionnement, avant évacuation ;
- pour les déchets à destination des centres de stockage en projet :
 - d'entreposages de déchets, notamment anciens, en attente de reprise, avant évacuation vers d'autres entreposages ou vers les centres de l'Andra en projet,
 - d'entreposages en attente de la disponibilité des filières de stockage,
 - d'entreposages pour les déchets de haute activité, qui doivent être entreposés plusieurs dizaines d'années en décroissance, avant de pouvoir être pris en charge en stockage profond.

► BILAN DES DÉCHETS SUR SITES PRODUCTEURS/DÉTENTEURS

Catégorie	Volume (m ³) présent sur sites producteurs/détenteurs à fin 2016
HA	3 650
MA-VL	45 000
FA-VL	90 500
FMA-VC	74 100
TFA	154 000
DSF	1 800

L'article 3 de l'arrêté du 9 octobre 2008 modifié impose que les producteurs déclarent à l'Andra des informations concernant les entreposages destinés à accueillir des colis de déchets radioactifs pour lesquels les solutions de gestion définitives n'existent pas ou sont à l'état de projet.

Par ailleurs, le PNGMDR recense les besoins prévisibles d'installations d'entreposage et précise les capacités nécessaires pour ces installations ainsi que les durées d'entreposage, afin de s'assurer de leur adéquation dans l'attente de la mise en service des sites de stockage HA, MA-VL et FA-VL. Les exploitants attribuent généralement aux entrepôts existants une durée prévisionnelle d'exploitation d'une cinquantaine d'années.

Par ailleurs, des extensions ou créations d'entreposages sont prévues pour répondre aux besoins évalués par les producteurs. Le tableau en page 32 recense les entreposages autorisés à fin 2016 destinés à accueillir des colis de déchets radioactifs pour lesquels les solutions de gestion définitives n'existent pas ou sont à l'état de projet avec leur taux d'occupation pour ceux qui sont en exploitation ; le tableau en page 33 présente les prévisions d'extension de certains de ces entreposages.

La nature, la quantité de déchets entreposés et les lieux d'entreposage sont décrits dans *L'Inventaire géographique*.

► INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE AUTORISÉES À FIN 2016 DESTINÉES À ACCUEILLIR DES COLIS DE DÉCHETS RADIOACTIFS POUR LESQUELS LES SOLUTIONS DE GESTION DÉFINITIVES N'EXISTENT PAS OU SONT À L'ÉTAT DE PROJET

Déclarant	Site	Colis de déchets pour lesquels l'entreposage a été conçu	Date de mise en service	Capacité d'accueil total en nombre de colis	Capacité utilisée en nombre de colis à fin 2016	Taux d'occupation à fin 2016
Framatome	CEZUS (Jarrie)	Déchets radifères	2005	5 980 ¹	3 800 ¹	64 %
Orano	Bâtiment S (La Hague)	Colis de boues bitumées	1987	20 000	11 798	59 %
Orano	Bâtiment ES (La Hague)	Colis de boues bitumées ²	1995	30 404	12 123	40 %
Orano	Bâtiment R7 (La Hague)	Colis CSD-V, CSD-B	1989	4 500	4 136	92 %
Orano	Bâtiment T7 (La Hague)	Colis CSD-V	1992	3 600	3 387	94 %
Orano	Bâtiment EEV/SE (La Hague)	Colis CSD-V, CSD-B	1996	4 428	4 406	100 %
Orano	Bâtiment EEV/LH Fosse 30 (La Hague)	Colis CSD-V, CSD-B	2013	4 212	3 872	92 %
Orano	Bâtiment EEV/LH Fosse 40 (La Hague)	Colis CSD-V, CSD-B	2017	4 212	0	0 %
Orano	Bâtiment ECC (La Hague)	Colis CSD-C	2002	20 800	14 981	72 %
Orano	Bâtiment EDS/EDT (La Hague)	Colis CBF-C'2 et CAC	1990	6 512	5 581	86 %
Orano	Bâtiment EDS/ADT1 (La Hague)	Colis CBF-C'2	2006	660	0	0 %
Orano	Bâtiment EDS/ADT2 (La Hague)	Colis CBF-C'2	2008	2 759	992	36 %
Orano	Bâtiment EDS/EDC-A (La Hague)	Colis de coques et embouts cimentés	2009	1 125	1 125	100 %
Orano	Bâtiment EDS/EDC-B et C (La Hague)	Colis de coques et embouts cimentés	1990	1 656	1 518	92 %
CEA DAM	Entreposage de déchets tritiés (Valduc)	Déchets tritiés	1995	5 000	3 733	75 %
			2012	16 620	11 455	69 %
CEA civil	Entreposage des colis d'enrobés bitumineux (nouvelle génération) (Marcoule)	Colis de boues bitumées	2000	4 235 ¹	3 957 ¹	93 %
CEA civil	Entreposage des colis de déchets vitrifiés (production) (Marcoule)	Colis de déchets vitrifiés et colis de déchets d'exploitation de l'atelier de production	1978	3 800	3 470	91 %
CEA civil	DIADEM	Colis de déchets irradiant et alpha de démantèlement	2021-2022	2 004	0	0 %
CEA civil	INB 56 (Cadarache)	Colis divers	1968	7 500 ¹	6 150 ¹	82 %
CEA civil	INB 164 (Cadarache)	Colis 500L, 870L, coques béton 500L de boues de filtration	2006	9 000	3 288	37 %
CEA civil	ICPE 420 et 465 (Cadarache)	Déchets radifères	1992	26 800	25 315	94 %
CEA civil	Entreposage des colis de déchets vitrifiés (pilote) (Marcoule)	Colis de verres du pilote	1976	46 ¹	13 ¹	28 %
CEA civil	Entreposage des colis d'enrobés bitumineux (ancienne génération) (Marcoule)	Colis de boues bitumées	1966	60 000	52 911	88 %
EDF	Iceda (Bugey)	Colis cimentés	2019 ³	2 186	0	0 %
Solvay	Usine Chef de Baie (La Rochelle)	Déchets radifères	1988	56 980 ¹	7 593 ¹	13 %

1 Capacité donnée en m³.

2 Le bâtiment ES de La Hague est aujourd'hui destiné à recevoir des fûts alpha (Pivic).

3 Iceda existe administrativement (INB 173) depuis l'autorisation de création obtenue par décret du 23 avril 2010.

► PRÉVISION D'EXTENSION D'ENTREPOSAGES

Déclarant	Site	Colis de déchets prévus pour l'entreposage	Date de mise en service prévisionnelle ²	Capacité d'accueil totale (en nombre de colis)
Orano	Bâtiment ECC (La Hague)	Colis CSD-C	2023	6 000
Orano	Bâtiment EEV/LH Fosses 50 et 60 (La Hague)	Colis CSD-V, CSD-B	2022	8 424
CEA civil	Entreposage des colis d'enrobés bitumineux (nouvelle génération) (Marcoule)	Colis de boues bitumées	~ 2020	4 235 ¹
CEA civil	INB 164-CEDRA (Cadarache)	Colis 500l, 870l, coques béton 500l de boues de filtration	~ 2028	9 000
CEA DAM	Entreposage de déchets tritiés (Valduc)	Déchets tritiés	2025	7 200
			2022	2 400

STOCKAGE DES DÉCHETS RADIOACTIFS

L'Andra exploite trois centres de stockage (voir dossier thématique 1). Le Centre de stockage de la Manche (CSM) est en phase de fermeture. Le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) destiné à stocker des déchets TFA et le Centre de stockage de l'Aube (CSA) destiné à stocker des déchets FMA-VC sont actuellement en phase de fonctionnement.



Le stockage des déchets radioactifs est défini à l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement comme « l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542-1, sans intention de les retirer ultérieurement. »

► TAUX DE REMPLISSAGE DES DIFFÉRENTS CENTRES DE STOCKAGE DE L'ANDRA

Site	Catégorie	Capacité d'accueil totale	Capacité utilisée à fin 2016	Taux de remplissage à fin 2016
Cires Morvilliers	TFA	650 000 m ³	330 000 m ³	51 %
CSA Soulaines-Dhuys	FMA-VC	1 000 000 m ³	320 000 m ³	32 %
CSM Digulleville	FMA-VC	530 000 m ³	530 000 m ³	100 %

76 % des déchets radioactifs déjà produits sont définitivement stockés dans les centres de l'Andra : les déchets TFA au Cires (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de

stockage) et les déchets FMA-VC au CSM (Centre de stockage de la Manche) et au CSA (Centre de stockage de l'Aube).

¹ Capacité donnée en m³.

² Les extensions ou nouvel entreposage sont mis en service au fur et à mesure du besoin.

LES MATIÈRES RADIOACTIVES

Une matière radioactive est définie dans l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement comme « une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement » (*voir chapitre 1*).

Les matières radioactives suivantes sont présentées dans ce chapitre :

- **les combustibles avant utilisation** (UNE, URE, mixtes uranium-plutonium ou des réacteurs de recherche) ;
- **les combustibles en cours d'utilisation** dans les centrales électronucléaires (UNE, URE ou mixtes uranium-plutonium) et dans les réacteurs de recherche ;
- **les combustibles usés** (UNE, URE, mixtes uranium-plutonium, RNR, des réacteurs de recherche ou de la défense nationale) en attente de retraitement ;
- **les rebuts de combustibles** (uranium ou mixtes uranium-plutonium) non irradiés ;
- **le plutonium** séparé non irradié ;
- **l'uranium naturel extrait de la mine** ;
- **l'uranium naturel enrichi** ;

- **l'uranium issu du retraitement de combustibles usés** ;
- **l'uranium enrichi issu du retraitement de combustibles usés** ;
- **l'uranium appauvri** ;
- **le thorium** ;
- **les matières en suspension** (sous-produit du traitement des terres rares) ;
- **les autres matières.**

QUANTITÉS DE MATIÈRES RADIOACTIVES

Les quantités de matières radioactives présentes sur le territoire français au 31 décembre 2016, y compris les matières étrangères visées à l'article L. 542-2-1 du Code de l'environnement, sont présentées dans le tableau ci-dessous.



L'unité utilisée pour présenter les quantités de matières radioactives est la tonne de métal lourd (tML), unité représentative de la quantité d'uranium, de plutonium ou de thorium contenue dans les matières sauf pour le combustible de la défense nationale exprimé en tonne d'assemblages (t).

► BILAN ET ÉVOLUTION DES MATIÈRES RADIOACTIVES

Matières radioactives	Masse à fin 2016 (tML sauf les combustibles usés de la défense nationale en tonne)	Écart 2016/2013 (tML sauf les combustibles usés de la défense nationale en tonne)
Combustibles UNE avant utilisation	448	+ 3
Combustibles UNE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	4 450	+ 95
Combustibles UNE usés, en attente de retraitement	11 400	- 548
Combustibles URE avant utilisation	-	-
Combustibles URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	53	- 150
Combustibles URE usés, en attente de retraitement	578	+ 156
Combustibles mixtes uranium-plutonium avant utilisation ou en cours de fabrication	38	0
Combustibles mixtes uranium-plutonium en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	430	+ 16
Combustibles mixtes uranium-plutonium usés, en attente de retraitement	1 840	+ 325
Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement	267	+ 33
Rebuts de combustibles uranium non irradiés en attente de retraitement	-	-
Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	120	- 28
Combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation	-	- 0,2
Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche	0,8	+ 0,6
Autres combustibles usés civils	59	- 16
Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	54	+ 2
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques	29 900	+ 3 810
Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	3 860	+ 1 090
Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-
Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	29 600	+ 2 690
Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	310 000	+ 23 500
Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes	8 570	+ 45
Matières en suspension (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)	5	0
Autres matières	70	- 2
Combustibles usés de la défense nationale	177	+ 21

LES ÉVOLUTIONS DEPUIS L'ÉDITION 2015



La catégorie de matières « Autres combustibles usés civils » a été créée par l'arrêté du 16 mars 2017 modifiant l'arrêté du 9 octobre 2008. Elle correspond à la fusion des catégories « Autres combustibles usés civils de type oxyde » et « Autres combustibles usés civils de type métallique » de l'édition 2015 de l'Inventaire national.

Les écarts constatés entre les quantités de matières radioactives à fin 2013 et celles à fin 2016 sont non seulement dus à la production nucléaire, mais également :

- au retraitement des combustibles UNE usés qui permet d'en extraire le plutonium et l'uranium qu'ils contiennent qui entraîne notamment une baisse en 2016 du stock de combustibles UNE usés et une augmentation du stock d'uranium issu du retraitement des combustibles usés ;
- à l'interruption de l'approvisionnement en combustibles URE dans les réacteurs EDF dans l'attente d'une filière industrielle optimisée ;
- à l'évolution du périmètre pris en compte pour les déclarations des combustibles des réacteurs de recherche incluant une partie des combustibles usés RNR et des autres combustibles usés civils ;
- à la constitution d'un stock stratégique d'uranium naturel enrichi ;
- à l'entreposage des combustibles usés MOX, URE, des rebuts, de l'uranium appauvri et de l'URT en attente de valorisation ;
- à la mise en cohérence des déclarations de l'Inventaire national et de la comptabilité nationale des matières nucléaires pour les assemblages RNR de Superphénix entreposés dans l'atelier pour l'évacuation du combustible de Creys-Malville (APEC) : la déclaration à fin 2016 intègre une ventilation légèrement différente des quantités de matières contenues dans les assemblages neufs et usés entre les catégories « Combustibles usés RNR, en attente de retraitement » et « Autres matières », ainsi qu'une prise en compte de la décroissance radioactive du plutonium contenu dans les assemblages usés et neufs fissiles. La quantité totale de combustibles RNR Superphénix est de 176 tML.

ENTREPOSAGE DES MATIÈRES RADIOACTIVES

► LES COMBUSTIBLES USÉS

L'entreposage en piscine est la première étape de la gestion des combustibles usés. La fonction de l'eau est d'assurer la protection radiologique des opérateurs ainsi que le refroidissement des combustibles.

La sortie des assemblages du cœur du réacteur électronucléaire se fait sous eau, de telle sorte qu'à aucun moment ils ne se retrouvent à l'air libre. Ils sont entreposés dans une piscine située à proximité immédiate du réacteur (elle sert également au chargement).

La durée de l'entreposage en piscine située à proximité immédiate du réacteur varie de 13 à 40 mois en France, le temps de laisser décroître suffisamment la radioactivité et la chaleur dégagée pour un transport vers l'usine de La Hague.

Les assemblages destinés à être retraités sont transportés à l'usine de La Hague où ils sont entreposés dans des piscines. La durée minimale de refroidissement des combustibles avant retraitement est de trois années. Après un séjour moyen de huit ans au total en piscine, les combustibles UNE sont retraités pour récupérer l'uranium et le plutonium qu'ils contiennent et les déchets résiduels sont conditionnés sous forme de déchets vitrifiés pour les produits de fission et actinides mineurs et compactés pour les coques et les embouts.

Les combustibles usés URE et MOX sont également entreposés dans ces piscines en attente d'une valorisation ultérieure, l'intention d'EDF étant de les retraiter à terme afin de réutiliser les matières qu'ils contiennent.

► L'URANIUM APPAUVRI

L'uranium appauvri peut se trouver sous deux formes qui sont entreposées dans des conditions adaptées à leurs caractéristiques :

- l' UF_6 est entreposé, généralement sous forme solide, dans des conteneurs cylindriques qui obéissent à des réglementations extrêmement strictes sur le plan international, du fait de son caractère très toxique en cas de contact avec la vapeur d'eau contenue dans l'air. Ces conteneurs sont conçus pour être entreposés à ciel ouvert ;
- l' U_3O_8 (qui se présente sous une forme très stable, analogue à celle de l'uranium naturel) est conditionné dans des conteneurs métalliques scellés dits « cubes verts », d'une contenance moyenne de l'ordre de 7 tonnes d'uranium. Ces conteneurs sont entreposés sous bâtiment.

En France, pour réduire « à la source » les risques liés à son entreposage, l'uranium appauvri destiné à être entreposé pour une longue période se trouve sous forme d' U_3O_8 .

► L'URANIUM ISSU DU RETRAITEMENT (URT)

L'URT est, quant à lui, généralement conditionné sous forme d' U_3O_8 dans des conteneurs. Ces conteneurs sont entreposés dans des bâtiments spécifiques sur le site Orano du Tricastin.



Certains pays ont fait le choix de ne pas retraiter leurs combustibles usés. Aux États-Unis, ils sont entreposés dans des piscines auprès des réacteurs qui les ont produits. Lorsque la température des combustibles a suffisamment décru, les assemblages sont sortis des piscines pour être entreposés à sec, sous circulation d'air, à l'intérieur de châteaux dont les parois épaisses protègent des radiations. En Suède, les combustibles usés sont regroupés et entreposés sous eau dans une installation en subsurface (25 mètres) en attente de la mise en service du stockage géologique.

LOCALISATION DES MATIÈRES RADIOACTIVES

La localisation des matières radioactives au 31 décembre 2016, est présentée ci-dessous.

L'uranium naturel extrait de la mine est entreposé principalement sur les sites d'Orano à Malvési et à Pierrelatte.

L'uranium naturel enrichi est entreposé sur les sites Orano de Pierrelatte, de Romans, de Marcoule et le site du CEA Cadarache.

Un peu plus de 173 000 tML d'uranium appauvri (Uapp) sont entreposées sur le site Orano du Tricastin, environ 136 000 tML sur le site Orano de Bessines-sur-Gartempe, 500 tML sur le site Orano à Malvési, 200 tML sur le site Orano de Marcoule et 110 tML sur différents sites du CEA.

Parmi les 29 600 tML d'URT entreposées sur les sites du Tricastin et de La Hague, 2 700 tML appartiennent à des clients étrangers.

Environ 6 300 tML de thorium sont entreposées sous forme de nitrate et d'hydroxydes sur le site de l'usine de La Rochelle. À cela s'ajoutent un peu moins de 2 300 tML de thorium entreposées sur le site CEA de Cadarache. Enfin, quelques tonnes de métal lourd de thorium appartenant à Orano sont entreposées sur les sites de Bessines et du Tricastin.

Les matières en suspension (MES), sous-produit du traitement des terres rares, sont entreposées sur le site de l'usine de La Rochelle.

Les combustibles UNE avant utilisation et en cours d'utilisation sont répartis dans les 19 centres nucléaires de production d'électricité de type REP en cours de fonctionnement. Les combustibles MOX avant utilisation et en cours d'utilisation sont répartis dans les centres nucléaires de production d'électricité du Blayais, de Chinon, de Dampierre, de Gravelines, de Saint-Laurent-des-Eaux et du Tricastin.

Les combustibles URE sont en cours d'utilisation dans les réacteurs du centre nucléaire de production d'électricité de Cruas.

3 400 tML de combustibles UNE usés sont entreposées sur les sites des 19 centres nucléaires de production d'électricité et environ 8 000 tML sur le site de La Hague. Par ailleurs, 30 tML de combustibles étrangers sont également entreposées sur le site de La Hague.

140 tML de combustibles URE usés sont entreposées sur le site du centre nucléaire de production d'électricité de Cruas et environ 440 tML sur le site de La Hague.

Environ 500 tML de combustibles MOX usés sont entreposées sur les sites des centres nucléaires de production d'électricité du Blayais, de Chinon, de Dampierre, de Gravelines, de Saint-Laurent-des-Eaux et du Tricastin et environ 1 300 tML sur le site de La Hague.

106 tML de combustibles RNR usés du réacteur Superphénix sont entreposées sur le site de Creys-Malville, 14 tML de combustibles RNR usés du réacteur Phénix sur le site de La Hague.

55 tML d'autres combustibles usés civils des réacteurs de recherche sont entreposés sur les sites du CEA et 4 tML sur le site de La Hague.

Environ 41 tonnes de plutonium sont entreposées dans l'usine Orano de La Hague, dont 15 tonnes appartenant à des clients étrangers ; 10 tonnes de plutonium sont en cours d'utilisation dans le processus de fabrication de combustibles MOX (sous forme de PuO_2 , d'oxyde mixte $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$ ou encore en assemblages MOX finis), dont une tonne appartient à des clients étrangers ; enfin, 2 tonnes de plutonium sont entreposées dans diverses installations du CEA.

Les rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement sont entreposés sur le site de La Hague.

Le cœur neuf de Superphénix est actuellement entreposé sur le site de Creys-Malville.

CASCAD (CASEMATE D'ENTREPOSAGE À SEC DE CADARACHE) L'ENTREPOSAGE DES COMBUSTIBLES USÉS À SEC

Des installations d'entreposage à sec existent également en France et accueillent des combustibles usés, en attente d'un choix de gestion ultérieur. Ainsi, l'installation Cascad située à Cadarache, opérationnelle depuis 1990 et exploitée par le CEA, a été conçue pour entreposer au moins sur 50 ans des combustibles nucléaires irradiés conditionnés dans des conteneurs en acier. Elle accueille notamment aujourd'hui pour la partie civile les combustibles irradiés en provenance

des réacteurs de première génération (EL2-EL3, centrale de Brennilis) et des combustibles usés du réacteur Phénix principalement. Une partie de l'installation comporte, outre les installations techniques de réception, de contrôle et de conditionnement, une cellule d'entreposage comprenant 319 puits. Ceux-ci sont refroidis par circulation d'air en convection naturelle.

BILAN DES STOCKS PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE

Dans cette partie, les déchets radioactifs et les matières radioactives répertoriés au 31 décembre 2016 sont présentés suivant leur secteur économique.

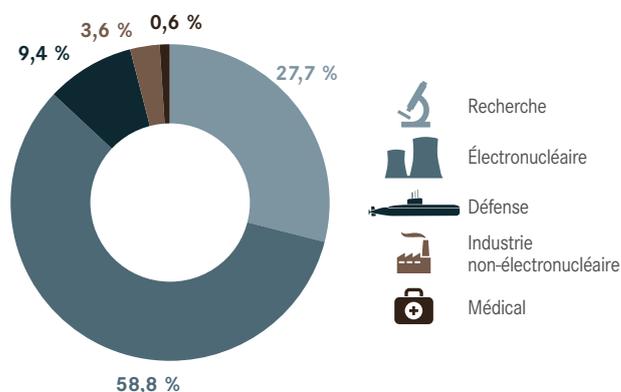
Les cinq secteurs économiques sont définis comme suit :

- **le secteur électronucléaire** qui comprend principalement les centres nucléaires de production d'électricité, ainsi que les usines dédiées à la fabrication du combustible nucléaire (extraction et traitement du minerai d'uranium, conversion chimique et enrichissement des concentrés d'uranium) et au retraitement des combustibles nucléaires usés ;
- **le secteur de la recherche** qui comprend la recherche dans le domaine du nucléaire civil, du médical, de la physique nucléaire et des particules, de l'agronomie, de la chimie, de la biologie, etc. ;
- **le secteur de la défense** qui concerne principalement la force de dissuasion, dont la propulsion nucléaire de certains navires ou sous-marins, la recherche associée mais également les activités liées aux armées ;
- **le secteur de l'industrie non-électronucléaire** qui comprend notamment l'extraction de terres rares, la fabrication de sources scellées mais aussi diverses applications comme le

contrôle de soudure, la stérilisation de matériels médicaux, la stérilisation et la conservation de produits alimentaires, etc. ;

- **le secteur médical** qui comprend les activités diagnostiques et thérapeutiques (scintigraphie, radiothérapie, etc.).

► RÉPARTITION DES DÉCHETS RADIOACTIFS À FIN 2016 PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE



► RÉPARTITION DU VOLUME TOTAL DE DÉCHETS PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE ET PAR CATÉGORIE

Volume à fin 2016 (m³)	Électronucléaire	Recherche	Défense	Industrie non-électronucléaire	Médical
HA	3 250	161	232	-	-
MA-VL	27 900	10 700	6 300	161	2
FA-VL	38 300	13 900	18 000	20 300	-
FMA-VC	592 000	232 000	63 100	22 200	8 410
TFA	243 000	170 000	56 500	12 100	88
Total	~ 905 000	~ 427 000	~ 144 000	~ 54 700	~ 8 500

► RÉPARTITION DE LA MASSE TOTALE DE MATIÈRES RADIOACTIVES PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE

Secteur économique	Quantité à fin 2016 (en tML)
Électronucléaire	395 000
Recherche	210
Défense	177 tonnes
Industrie non-électronucléaire	6 400
Médical	-

SECTEUR ÉLECTRONUCLÉAIRE

Ce secteur économique comprend les centres nucléaires de production d'électricité, les installations du cycle du combustible, les installations de traitement des déchets et les centres de maintenance des installations relevant de ce secteur.

Les déchets de catégories HA, MA-VL et FMA-VC sont majoritairement issus de ce secteur économique.

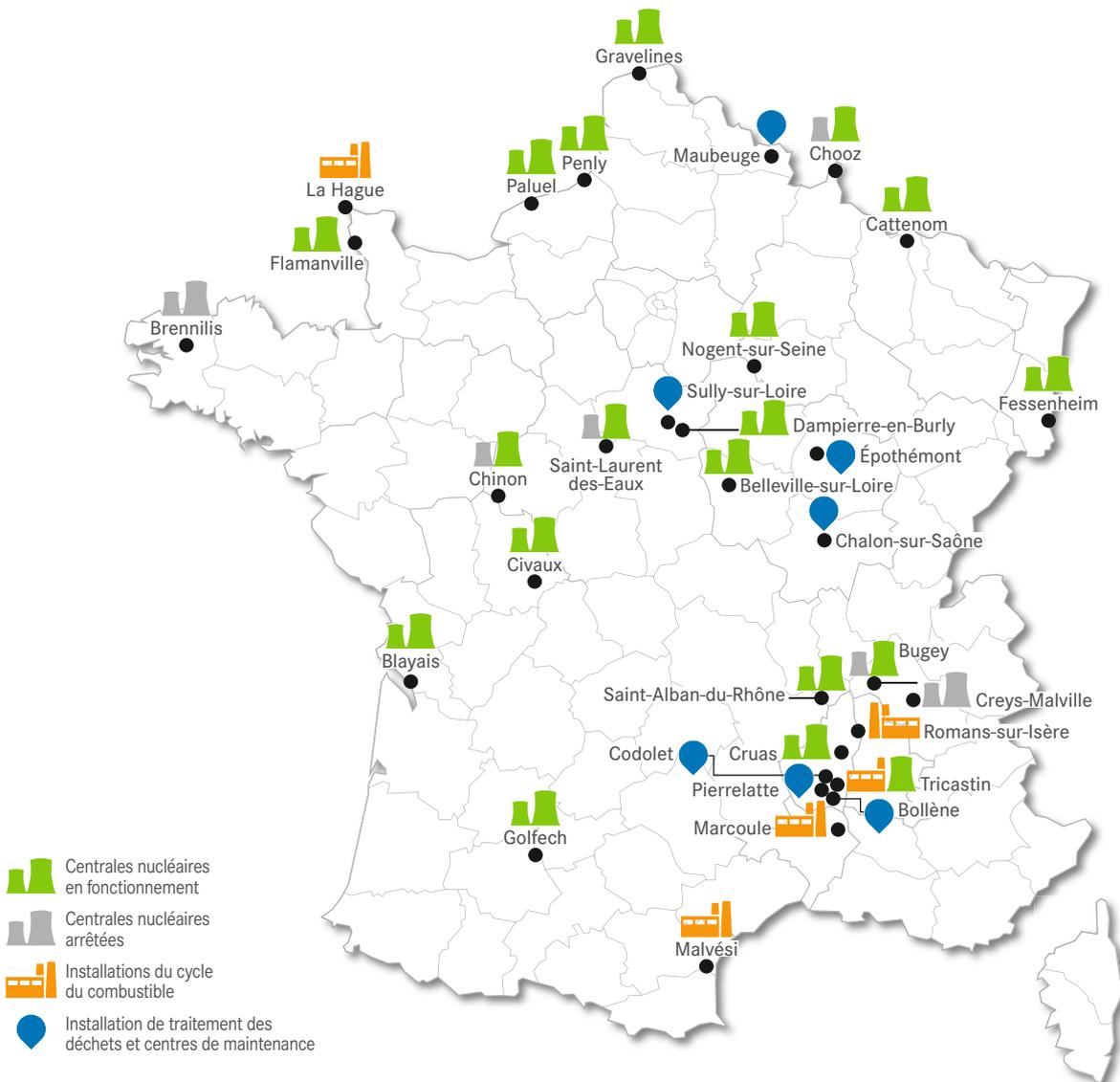
Ce secteur comprend toutes les matières radioactives concernant les combustibles UNE, MOX et URE, ainsi que du plutonium, du thorium et de l'uranium sous toutes ses formes physico-chimiques. Les combustibles neufs et irradiés de Superphénix sont compris dans ce secteur.

LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

► LES RÉACTEURS EN COURS DE FONCTIONNEMENT

Le parc électronucléaire français se compose actuellement de 58 réacteurs nucléaires en fonctionnement implantés sur 19 sites géographiques.

En France, la filière eau légère, avec 58 unités REP (Réacteur à eau sous pression) fonctionnant à l'uranium enrichi, mise en service de 1977 à 1999, constitue l'intégralité du parc en fonctionnement.



Un réacteur également à eau sous pression de technologie EPR (site de Flamanville) est en cours de construction et viendra compléter le parc en fonctionnement à sa mise en service.

Le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité d'EDF et les activités de maintenance associées engendrent majoritairement des déchets TFA et FMA-VC ainsi que dans une moindre mesure des déchets MA-VL.

Au-delà des déchets HA et MA-VL issus du retraitement du combustible irradié des centres nucléaires de production d'électricité, le fonctionnement de l'usine de retraitement produit également des déchets MA-VL, FMA-VC et TFA.

Les déchets MA-VL produits par les réacteurs en phase de fonctionnement sont principalement des grappes poisons (grappes fixes dont le rôle est de réduire la réactivité du cœur pendant le premier cycle de fonctionnement) et des grappes de commande (grappes mobiles dont les crayons absorbants coulissent dans l'assemblage combustible en vue de réguler la puissance du réacteur).

L'hypothèse de conditionnement retenue par EDF est une cimentation de ces déchets métalliques dans une installation centralisée sur le site du Bugey (Icèda) qui assurera le découpage, le conditionnement en conteneur béton et l'entreposage intermédiaire des colis.

Les déchets FMA-VC et TFA sont constitués d'équipements, de résidus de filtration/épuration (résines, filtres, boues, etc.), de consommables (tenues vinyle, coton, etc.) ou encore de pièces mises au rebut (robinets, tubes, etc.).

Ces déchets ont été contaminés par contact avec les fluides (eau du circuit primaire, air de ventilation, etc.) qui véhiculent les produits de fission ou les produits de corrosion activés lors de leur passage en cœur.

À l'exception des déchets incinérables et des ferrailles destinées à la fusion, qui sont dirigés vers les unités de Centraco de Cyclife, les déchets FMA-VC d'EDF sont conditionnés sur les sites des centres nucléaires de production d'électricité dans des colis en béton, des fûts ou des caissons métalliques.



Le retraitement du combustible usé : entre 2 et 3 m³ de déchets HA et entre 4 et 5 m³ de déchets MA-VL sont produits annuellement, pour un réacteur. Le démantèlement : il est prévu que la déconstruction d'un réacteur REP produise en moyenne 18 000 m³ de déchets radioactifs, majoritairement FMA-VC et TFA, cette quantité de déchets variant en fonction de la puissance du réacteur.

Les déchets TFA d'EDF sont de natures variées. Il s'agit de déchets issus des « zones à production possible de déchets nucléaires » des centres nucléaires de production d'électricité présentant un niveau de radioactivité très bas voire, dans certains cas, difficilement mesurable. Une partie de ces déchets est générée par le démantèlement des réacteurs les plus anciens et par le fonctionnement des centres nucléaires de production d'électricité.

Les importantes opérations de maintenance dans les centres nucléaires de production d'électricité du parc, notamment le remplacement des générateurs de vapeur et des couvercles de cuve, produisent des déchets volumineux. EDF considère qu'une partie des générateurs de vapeur est valorisable.

Les combustibles en réacteurs électronucléaires

Les assemblages combustibles REP séjournent quelques années dans le cœur des réacteurs de production d'électricité. Puis, une fois déchargés, ils sont entreposés dans une piscine de refroidissement à proximité du réacteur avant d'être évacués vers l'usine de retraitement de La Hague.

Un réacteur de 900 mégawatts utilise en permanence 157 assemblages combustibles, chacun d'entre eux contenant environ 500 kg d'uranium. Les matières radioactives présentes dans les réacteurs électronucléaires sont majoritairement des combustibles UNE à base d'oxyde d'uranium et, dans une moindre mesure, des combustibles MOX à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium autorisés dans 24 réacteurs. L'approvisionnement des combustibles URE à l'uranium de retraitement enrichi est actuellement suspendu. Quatre réacteurs sont autorisés à utiliser du combustible de type URE fabriqué à partir d'uranium de retraitement enrichi.

► RÉACTEURS EN SERVICE

Site et dates de couplage au réseau (premier réacteur – dernier réacteur)	Nombre de réacteurs en fonctionnement – filiale REP	Puissance nette par réacteur en MWe*	Nombre de réacteurs autorisés à charger du combustible MOX
Fessenheim (04/1977 – 10/1977)	2	880	-
Bugey (05/1978 – 07/1979)	4	910/880	-
Gravelines (03/1980 – 08/1985)	6	910	6
Dampierre (03/1980 – 08/1981)	4	890	4
Tricastin (05/1980 – 06/1981)	4	915	4
Saint-Laurent-des-Eaux B (01/1981 – 06/1981)	2	915	2
Blayais (06/1981 – 05/1983)	4	910	4
Chinon B (11/1982 – 11/1987)	4	905	4
Cruas (04/1983 – 10/1984)	4	915	-
Paluel (06/1984 – 04/1986)	4	1 330	-
Saint-Alban (08/1985 – 07/1986)	2	1 335	-
Flamanville (12/1985 – 07/1986)	2	1 330	-
Cattenom (11/1986 – 05/1991)	4	1 300	-
Bellemeville (10/1987 – 07/1988)	2	1 310	-
Nogent-sur-Seine (10/1987 – 12/1988)	2	1 310	-
Penly (05/1990 – 02/1992)	2	1 330	-
Golfech (06/1990 – 06/1993)	2	1 310	-
Chooz B (08/1996 – 04/1997)	2	1 455	-
Civaux (12/1997 – 12/1999)	2	1 450	-
19 sites	58 réacteurs	63,1 GWe	24 réacteurs

* MWe : mégawatt électrique.

La puissance électrique prévue pour l'EPR de Flamanville est de 1 650 MWe.

► LES RÉACTEURS EN DÉMANTÈLEMENT

EDF a exploité six réacteurs de l'ancienne filière UNGG (uranium naturel graphite gaz) développée par le CEA répartis sur trois sites : les trois réacteurs de Chinon A, les deux réacteurs de Saint-Laurent-des-Eaux A et le réacteur de Bugey 1. Le démantèlement de ces réacteurs est engagé et les déchets résultants sont comptabilisés dans ce secteur économique.

Le début de démantèlement du premier caisson réacteur UNGG, tête de série UNGG d'EDF, est prévu vers 2035. La production des premiers colis FA-VL graphite doit débuter dès 2030 par le reconditionnement des déchets (chemises) contenus dans

les silos de Saint-Laurent A. L'évacuation des déchets FA-VL graphite EDF est prévue à l'horizon 2070. Les chemises graphites entreposées dans des silos sur le site de Saint-Laurent-des-Eaux et sur les sites de Marcoule et de La Hague sont comptabilisées comme déchets déjà produits.

Par ailleurs, trois réacteurs de trois filières différentes sont également en cours de démantèlement. Il s'agit du premier REP à Chooz, du réacteur à eau lourde EL4 de Brennilis et du réacteur à neutrons rapides de Creys-Malville.

Sur le site de Creys-Malville sont actuellement entreposés les combustibles RNR irradiés et le cœur neuf du réacteur Superphénix.

► RÉACTEURS EN DÉMANTÈLEMENT

Site	Type	Nombre de réacteurs
Chooz	REP : réacteur à eau pressurisée	1
Brennilis	EL : eau lourde	1
Saint-Laurent-des-Eaux	UNGG : uranium naturel graphite gaz	2
Chinon	UNGG : uranium naturel graphite gaz	3
Bugey	UNGG : uranium naturel graphite gaz	1
Creys-Malville	RNR : réacteur à neutrons rapides (surgénérateur)	1

LES INSTALLATIONS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Le minerai d'uranium extrait de la mine est concassé, broyé puis imprégné d'une solution d'acide oxydante pour dissoudre l'uranium afin de l'extraire sélectivement de la solution. Viennent ensuite plusieurs étapes de purification avant d'obtenir un concentré minier d'uranium appelé *yellow cake*. C'est sous cette forme que le minerai arrive dans l'usine de conversion en France.



Yellow Cake



Mine d'uranium à ciel ouvert

LES DÉCHETS ISSUS DE L'EXTRACTION DU MINERAI D'URANIUM

L'exploitation minière d'uranium en France s'est terminée en 2001. Les résidus de traitement des minerais ainsi que quelques déchets induits sont stockés de façon définitive sur d'anciens sites miniers (*voir chapitre 4*).

► CONVERSION

Après la purification de l'uranium contenu dans les concentrés miniers, il est transformé en hexafluorure d'uranium (UF_6), forme sous laquelle il se trouve dans un état gazeux à une température de 60 °C : c'est l'étape de la conversion. Cet état gazeux est indispensable au procédé utilisé dans les usines d'enrichissement.



Cristaux d'hexafluorure d'uranium

Cette transformation se fait en deux étapes :

- dans l'usine d'Orano à Malvési où le *yellow cake* devient tétrafluorure d'uranium (UF_4) ;
- puis dans l'usine d'Orano à Tricastin où un procédé de fluoration permet de passer du tétrafluorure à l'hexafluorure d'uranium.

Le traitement chimique mis en œuvre à l'usine Orano de Malvési induit des résidus solides et des effluents liquides.

La matière radioactive mise en œuvre dans l'étape de conversion est l'uranium naturel extrait de la mine sous différentes formes physico-chimiques.

► ENRICHISSEMENT

L'uranium naturel est principalement composé de deux isotopes : l'uranium 238 et l'uranium 235. L'uranium 235, fissile, est beaucoup moins abondant à l'état naturel que l'uranium 238 : il ne représente que 0,7 % de l'uranium naturel.

L'enrichissement consiste à augmenter la proportion d'uranium 235.

Aujourd'hui, la plupart des réacteurs utilisent comme combustible de l'uranium enrichi à 4 % environ en uranium 235.

Le procédé d'enrichissement mis en œuvre par l'usine George-Besse II d'Orano sur le site de Tricastin depuis 2011 est la centrifugation.

Le gaz UF_6 est introduit dans un cylindre tournant à très haute vitesse, sous vide, dans un carter étanche.

Les molécules les plus lourdes, sous l'effet de la force centrifuge, sont envoyées à la périphérie du tube tandis que les plus légères uranium 235 migrent vers le centre.

De plus, le gaz est mis en circulation axiale par des mécanismes physiques. Le gaz contenant les molécules les plus légères situé au centre est transporté vers le haut tandis que le gaz contenant les molécules les plus lourdes descend.

Les produits enrichis et appauvris sont récupérés aux deux extrémités, respectivement haute et basse, du tube.

Cette étape élémentaire de séparation des molécules est répétée au sein d'un ensemble de centrifugeuses mises en série, appelé cascades.

Les établissements de conversion et d'enrichissement du combustible produisent des déchets de fonctionnement radioactifs, faiblement ou très faiblement contaminés en uranium, qui sont stockés au CSA et au Cires. Ils sont généralement conditionnés dans des fûts ou des caissons.

Les matières radioactives obtenues après l'étape d'enrichissement sont l'uranium naturel enrichi et l'uranium naturel appauvri.

► FABRICATION DU COMBUSTIBLE

Les combustibles fabriqués pour la production d'électricité sont essentiellement de deux types : UNE (à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi) et MOX (à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium).

■ Le combustible UNE (à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi)

L'hexafluorure d'uranium (UF_6) enrichi est transformé en poudre d'oxyde d'uranium puis compacté sous forme de pastilles pour permettre la fabrication des combustibles UNE. Les pastilles sont introduites dans des gaines métalliques, assurant leur maintien, pour constituer les assemblages combustibles.



Pastilles de combustible

L'usine Framatome de Romans réalise ces deux opérations. Les déchets produits par l'usine sont essentiellement des déchets TFA issus du fonctionnement et de la maintenance des installations.

■ Le combustible MOX (à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium)

L'usine Melox d'Orano, implantée sur le site de Marcoule, fabrique depuis 1995 le combustible MOX selon un procédé similaire au procédé de fabrication du combustible UNE, mais qui utilise un mélange de poudres d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium.

Le plutonium utilisé est issu du retraitement des combustibles usés mis en œuvre à l'usine d'Orano de La Hague. De l'uranium naturel appauvri issu de l'étape d'enrichissement de l'uranium est également utilisé.

Les déchets produits par Melox sont des déchets technologiques FMA-VC et MA-VL dont une partie est non irradiante mais contaminée en radionucléides émetteurs alpha.

Melox produit également des rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés (pastilles, poudres, etc.) considérés comme des matières radioactives et qui n'ont pas pu être directement recyclées dans le circuit de production. Les rebuts sont dirigés vers La Hague pour entreposage en vue d'une utilisation ultérieure.

Le complexe de fabrication de Cadarache (CFCa) implanté sur le centre du CEA de Cadarache a également produit du combustible MOX jusqu'en juillet 2003.



La production de combustible MOX à Cadarache est aujourd'hui arrêtée. Le démantèlement a débuté en 2007. La production industrielle de l'usine Melox a démarré en 1995. Son autorisation de production est de 195 tML de combustible MOX par an (tonne de métal lourd), destiné aux réacteurs français et étrangers de la filière eau légère.

► LE RETRAITEMENT DU COMBUSTIBLE

En sortie de réacteur, les combustibles usés de type UNE contiennent environ 95 % d'uranium, 1 % de plutonium et 4 % de déchets ultimes.

Le procédé de retraitement des combustibles usés consiste d'une part à récupérer les matières valorisables que sont l'uranium et le plutonium, et à conditionner les déchets ultimes d'autre part.

Les opérations menées dans les usines de retraitement peuvent se décomposer sommairement en trois étapes :

- réception et entreposage en piscines des assemblages de combustibles usés pour refroidissement avant retraitement (pendant quelques années) ;
- retraitement des assemblages de combustibles usés par :
 - cisailage mécanique des assemblages en tronçons de 35 mm environ,
 - dissolution chimique du combustible usé contenu dans ces tronçons par de l'acide nitrique,
 - séparation de l'uranium et du plutonium dissous par extraction chimique et purification. L'uranium de recyclage issu du retraitement des combustibles usés (URT) est transféré vers l'atelier du Tricastin pour être transformé sous forme d' U_3O_8 . Le plutonium séparé est envoyé à l'usine de fabrication du combustible MOX (Melox) ;
- traitement et conditionnement des déchets ultimes sous des formes stables, adaptées à leur activité et aux périodes radioactives des éléments qu'ils contiennent :

- les produits de fission et les actinides mineurs sont incorporés à une matrice de verre, coulée dans un conteneur en acier inoxydable (CSD-V) ; ces déchets constituent la majeure partie des déchets HA,
- les composants métalliques des assemblages REP (tubes de gainage, grilles, embouts) sont aujourd'hui décontaminés, compactés et conditionnés en conteneurs standard de déchets compactés (CSD-C). Auparavant, ces déchets de structure étaient mélangés à une matrice cimentaire. Le compactage a permis d'optimiser le volume de déchets à stocker. Ces deux familles de déchets constituent une grande part des déchets MA-VL,
- les déchets de structure des assemblages de la filière UNGG sont actuellement entreposés dans des silos à La Hague, à Marcoule ou sur le site de Saint-Laurent-des-Eaux. Le procédé de conditionnement est en cours d'étude.

Le retraitement des combustibles génère également des déchets de maintenance et de fonctionnement conditionnés dans différents types de conteneurs en fonction de leur nature, de leur niveau d'activité et de leur filière de gestion. En général, les déchets solides MA-VL (outillages, gants, filtres, etc.) sont compactés et mis en fût ; les modes de conditionnement des boues issues du traitement des effluents ont évolué. Dans un premier temps, le bitumage qui consistait à enrober les boues dans du bitume a été utilisé. L'optimisation des procédés de conditionnement et l'évolution des contraintes liées à la sûreté ont conduit à l'utilisation d'autres procédés tels que la vitrification ou la cimentation. Les déchets FMA-VC sont stockés au CSA. Ils peuvent être préalablement traités à l'usine Centraco de Cyclife par incinération ou fusion en fonction de leur nature physico-chimique.

Les déchets TFA sont conditionnés en big-bag ou en conteneur métallique pour être transférés et stockés au Cires.

OPÉRATIONS MENÉES DANS LES USINES DE RETRAITEMENT

Les opérations de retraitement de combustibles usés dans la première usine de retraitement (sur Marcoule) se sont arrêtées fin 1997 et ont été rapidement suivies par le démarrage du programme de démantèlement, qui est le plus grand chantier de démantèlement en France.

Ces opérations de démantèlement (désormais de responsabilité CEA), hors installations de support, devraient produire plusieurs milliers de tonnes de déchets, en majorité stockables dans un site de surface.

En 1966, une deuxième usine de retraitement de combustibles usés a été mise en service, sur le site de La Hague : UP2-400. Elle a été exploitée par le CEA jusqu'en 1976, puis par Cogema (successivement Areva puis aujourd'hui Orano), elle est aujourd'hui arrêtée. D'une capacité de 400 tonnes de combustibles par an, l'usine UP2-400 a d'abord retraité des combustibles usés de la filière UNGG, puis a été adaptée pour pouvoir retraiter des combustibles de la filière REP.

De 1976 à 1987, l'usine UP2-400 a ainsi retraité en alternance des combustibles usés provenant aussi bien de la filière UNGG que de la filière REP.

À partir de 1987, UP2-400 a été affectée en particulier à la filière REP, tandis que l'usine de Marcoule assurait le retraitement des combustibles provenant des autres filières.

Pour faire face aux besoins français et étrangers, Orano a entrepris au début des années 1980 la construction de deux nouvelles usines, de même capacité (de l'ordre de 800 tonnes/an chacune) qui assurent aujourd'hui le retraitement des combustibles usés, de même capacité :

- UP3 (démarrée en 1990) était initialement dédiée aux combustibles usés fournis par les clients étrangers ;
- UP2-800 a été mise en service en août 1994, et a pris le relais de l'usine UP2-400 (arrêtée le 1^{er} janvier 2004).

LES INSTALLATIONS DE TRAITEMENT DES DÉCHETS ET LES CENTRES DE MAINTENANCE

L'exploitation des différentes installations qui manipulent de la radioactivité s'accompagne d'opérations industrielles annexes mais obligatoires : le traitement des déchets liés au fonctionnement et les centres de maintenance. Généralement, l'exploitant effectue ce traitement et gère les déchets induits.

Dans certains cas, l'exploitant peut faire appel à des établissements dédiés, situés sur d'autres sites qui réalisent ces opérations.

► LES CENTRES DE TRAITEMENT DES DÉCHETS

L'installation Centraco de Cyclife à Codolet exploite deux procédés :

- la fusion des déchets métalliques ;
- l'incinération de certains déchets.

Elle traite des déchets solides incinérables et liquides de faible activité produits par les installations nucléaires, les laboratoires de recherche et les hôpitaux. Les cendres et les mâchefers qui en résultent sont inertés et conditionnés dans des colis destinés aux centres industriels de l'Andra dans l'Aube. Les lingots issus de la fusion de déchets métalliques sont soit valorisés pour réaliser des protections radiologiques intégrées aux colis de déchets, soit destinés aux centres industriels de l'Andra dans l'Aube.

Les sociétés STMI et Socatri à Bollène sont spécialisées dans des opérations de transformation, de conditionnement et d'entreposage de matériaux radioactifs en vue de leur décontamination. À ce titre, elles produisent des déchets radioactifs.

La société Daher à Épothémont est spécialisée notamment dans le tri et le conditionnement de déchets TFA selon les spécifications de l'Andra ou de Centraco de Cyclife. L'installation Sogeval d'Onet Technologies à Pierrelatte propose notamment des services de traitement et d'entreposage de déchets radioactifs.

► LES CENTRES DE MAINTENANCE

Des entreprises spécialisées assurent la maintenance des grandes installations ou la décontamination de certains équipements.

Ces centres de maintenance détiennent en général des quantités plus limitées de déchets que les centres de traitement des déchets, en majorité destinées au CSA.

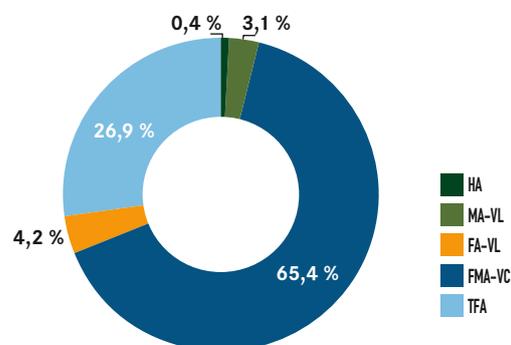
La société Somanu (Société de maintenance nucléaire), à Maubeuge, est spécialisée dans la réparation, l'entretien et l'expertise de matériels provenant principalement du circuit primaire des réacteurs et de ses auxiliaires.

Le Centre de maintenance des outillages (Cemo) à Chalon-sur-Saône et le Centre d'entretien et de décontamination d'outillage (Cedos) à Sully-sur-Loire mènent des opérations de maintenance de l'outillage utilisé lors des interventions sur les sites nucléaires.

► BILAN DES MATIÈRES RADIOACTIVES DU SECTEUR ÉLECTRONUCLÉAIRE

Catégorie	Masse à fin 2016 (tML)
Combustibles UNE avant utilisation	448
Combustibles UNE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	4 450
Combustibles UNE usés, en attente de retraitement	11 400
Combustibles URE avant utilisation	-
Combustibles URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	53
Combustibles URE usés, en attente de retraitement	578
Combustibles mixtes uranium-plutonium avant utilisation ou en cours de fabrication	38
Combustibles mixtes uranium-plutonium en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	430
Combustibles mixtes uranium-plutonium usés, en attente de retraitement	1 840
Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement	267
Rebuts de combustibles uranium non irradiés en attente de retraitement	-
Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	106
Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	52
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques	29 800
Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	3 850
Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	-
Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	29 600
Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	310 000
Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes	2 270
Autres matières (cœur neuf de Superphénix)	70

► BILAN DES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR ÉLECTRONUCLÉAIRE



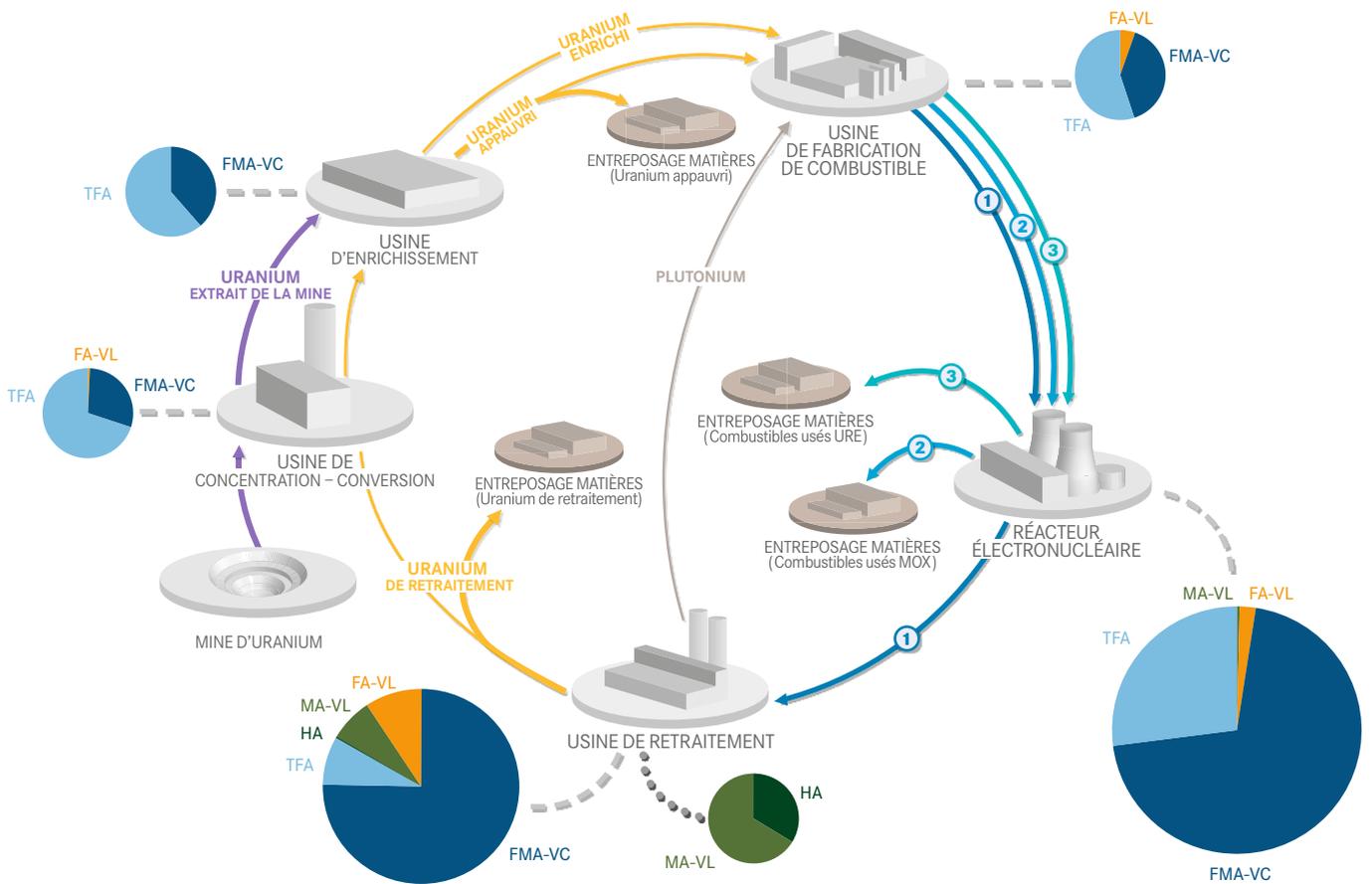
Catégorie	Volume à fin 2016 (m³)
HA	3 250
MA-VL	27 900
FA-VL	38 300
FMA-VC	592 000
TFA	243 000
Total	~ 905 000

► VOLUME DE DÉCHETS DE L'USINE D'ORANO DE MALVÉSI

Déchets de Malvési	Volume à fin 2016 (m³) ¹
Boues des bassins de décantation	70 400
RTCU historiques	282 000
Effluents nitrates	374 000

¹ Les quantités sont exprimées en volume brut.

► FOCUS SUR LA PRODUCTION DE MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS PAR LE SECTEUR ÉLECTRONUCLÉAIRE EN FRANCE



- ① Combustible à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi (UNE)
- ② Combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX)
- ③ Combustible à base d'oxyde d'uranium de retraitement enrichi (URE)
- Déchets de fonctionnement et de démantèlement - Stocks à fin 2016
- Déchets résiduels après retraitement des combustibles usés - Stocks à fin 2016

SECTEUR DE LA RECHERCHE

Le secteur de la recherche regroupe toutes les activités de recherche, à l'exception de celles menées pour le secteur de la défense, qui sont intégrées à ce dernier. Les activités de recherche pour le secteur électronucléaire et le secteur médical en font donc partie.

Ce secteur comprend :

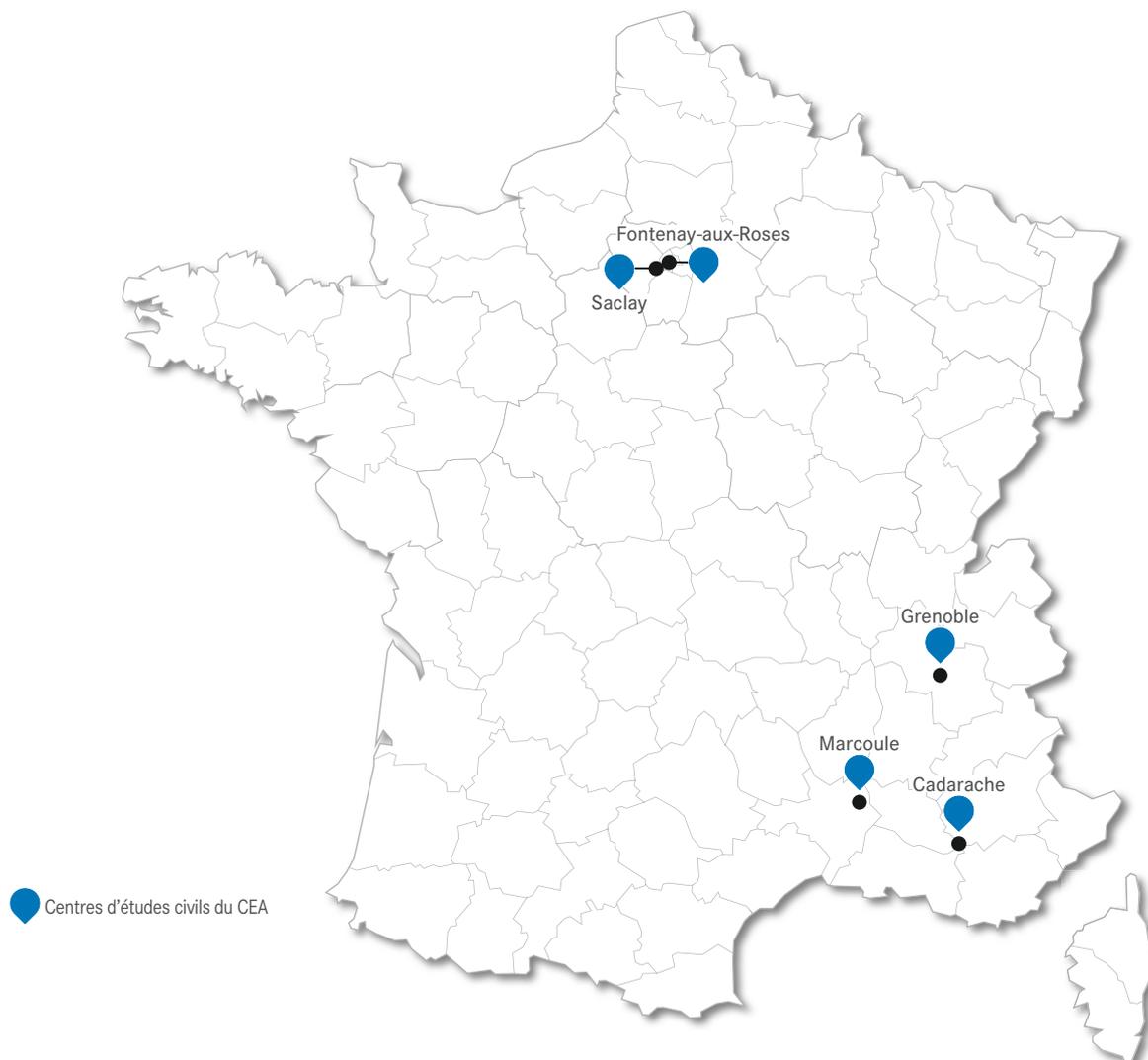
- les installations et les établissements des quatre centres d'études civils du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) : Cadarache, Marcoule, Paris-Saclay, Grenoble ;
- tous les établissements publics ou privés à vocation de recherche par exemple : le Centre européen pour la recherche nucléaire à Prévessin-Moëns (Cern), l'institut Laue-Langevin à Grenoble (ILL), le Grand Accélérateur d'ions lourds à Caen (Ganil) ou encore l'institut de physique nucléaire d'Orsay

(IPN d'Orsay). Parmi ces établissements, la plupart utilisent la radioactivité en particulier comme un outil de caractérisation.

Les déchets radifères produits par l'assainissement de l'ancienne usine de traitement de minerais d'uranium du Bouchet exploitée par le CEA entre 1946 et 1970 sont attribués à ce secteur économique.

Les matières radioactives du secteur de la recherche correspondent aux combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation, en cours d'utilisation ou usés. Ce secteur comprend également une part de plutonium et d'uranium sous toutes ses formes physico-chimiques. Le combustible de Phénix en attente de retraitement contribue également à ce secteur économique.

LES ÉTABLISSEMENTS DES CENTRES D'ÉTUDES CIVILS DU CEA



De par le nombre et la variété des activités nucléaires du CEA civil, les déchets produits et à gérer sont d'une variété très étendue, dont la majeure partie relève des activités liées à l'énergie nucléaire au sein de la Direction de l'énergie nucléaire (DEN).

La Direction de l'énergie nucléaire (DEN) apporte aux pouvoirs publics et aux industriels les éléments d'expertise et d'innovation sur les systèmes de production d'énergie nucléaire actuels et futurs, selon trois axes majeurs :

- les systèmes nucléaires du futur, dits de quatrième génération, réacteur et cycle du combustible associé (dont le projet Astrid) ;
- l'optimisation du nucléaire industriel actuel en soutien aux industriels ;
- le développement et l'exploitation de grands outils expérimentaux et de simulation indispensables pour mener ses recherches.

En parallèle, en tant qu'exploitant nucléaire civil, la DEN gère et fait évoluer son parc d'installations nucléaires de recherche (réacteurs de recherche ou maquettes critiques, laboratoires chauds qui permettent de réaliser des études sur les objets irradiés, les plateformes expérimentales) et d'installation de support (atelier, laboratoire d'analyse et caractérisation, installation de traitement des déchets, d'entreposage, etc.). Elle mène des programmes de construction et de rénovation de ses installations, ainsi que des programmes d'assainissement et de démantèlement de celles arrivées en fin de vie et gère les déchets qu'elle produit. Elle développe dans certains cas les méthodes et les outils adaptés à ces opérations.

La Direction de l'énergie nucléaire (DEN) déploie ses activités principalement sur trois centres :

► MARCOULE (GARD)

Les activités nucléaires du centre de Marcoule concernent plus particulièrement la recherche sur le cycle du combustible nucléaire et la réalisation d'importants chantiers d'assainissement et démantèlement (AD) et de reprise et de conditionnement de déchets (RCD) des installations à l'arrêt (atelier pilote et usine liés au retraitement, réacteurs UNGG et Phénix, etc.).

Les installations du centre de Marcoule en cours de fonctionnement (notamment Atalante) sont dédiées à la recherche et au développement de techniques de préparation de l'uranium, de retraitement des combustibles nucléaires usés, de techniques de démantèlement des installations nucléaires en fin de vie et de gestion des déchets les plus radioactifs.

Le réacteur Phénix (à l'arrêt depuis fin 2009), construit et exploité par le CEA et EDF, était un outil de recherche notamment pour des programmes sur la consommation du plutonium et l'incinération des actinides.

► CADARACHE (BOUCHES-DU-RHÔNE)

Les activités nucléaires du centre de Cadarache sont orientées principalement vers la recherche sur l'optimisation des réacteurs nucléaires et les études de comportement des combustibles à base d'uranium ou de plutonium dans différentes configurations et sur les réacteurs de quatrième génération.

Le site dispose d'installations de R&D sur les combustibles nucléaires (réacteur expérimental de la filière RNR aujourd'hui arrêté : Rapsodie, ou de la filière REP : Scarabée, Cabri) et les matériaux irradiés, des installations de traitement des déchets et des installations d'entreposage de déchets et de matières. Le réacteur Jules-Horowitz (RJH) en cours de construction sera utilisé pour le développement et la qualification des matériaux et des combustibles nucléaires mais également pour la médecine nucléaire.

► PARIS-SACLAY

Pluridisciplinaire, le centre de Paris-Saclay (regroupant depuis 2017 les établissements de Saclay et de Fontenay-aux-Roses) exerce ses activités dans l'ensemble des domaines du CEA civil, tels que l'énergie nucléaire, les sciences du vivant, les sciences de la matière, le climat et l'environnement, la recherche technologique et l'enseignement.

■ Établissement de Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine)

L'établissement de Fontenay-aux-Roses est en pleine mutation et se tourne vers les applications médicales (radiobiologie, maladies émergentes, thérapies innovantes et génomiques, etc.). Ses installations nucléaires de recherche, mises à l'arrêt, font l'objet d'un programme de démantèlement. Les déchets produits sont, pour la plupart, contaminés par des émetteurs alpha ainsi que par des produits de fission.

Sur ce site, les recherches nucléaires concernaient les domaines du génie chimique, du retraitement des combustibles et de la chimie des éléments transuraniens.

■ Établissement de Saclay (Essonne)

Les principales activités de l'établissement de Saclay concernent les énergies, le réchauffement climatique, la santé (cancer, maladie d'Alzheimer, prion, etc.), les nanosciences, la robotique, les sciences fondamentales, etc. Il joue également un rôle prépondérant dans la conception et la réalisation des Très Grandes Infrastructures de recherche (TGIR).

Les activités nucléaires sont tournées plus particulièrement vers la recherche amont, la simulation, les matériaux et la chimie, ainsi que des opérations d'AD et RCD.

Le centre de Saclay dispose de moyens nucléaires lourds (laboratoires d'examen, réacteurs Orphée et Osiris à l'arrêt depuis 2015) pour la recherche fondamentale, les recherches appliquées aux besoins de la production électronucléaire, la production de radio-isotopes médicaux, la recherche pour les applications médicales.

Une partie des déchets produits est traitée et conditionnée dans les installations supports du centre : INB 72 pour les solides et INB 35 pour les liquides. D'autres sont transférés vers Marcoule

ou Cadarache pour traitement et entreposage éventuel, avant leur évacuation vers un site de l'Andra existant ou en projet.

Le centre de Grenoble (Isère)

Le programme de dénucléarisation du centre CEA de Grenoble porte sur six installations nucléaires, dont la plus ancienne date de 1958 : trois réacteurs de recherche (Mélusine, Siloette, Siloé), le Laboratoire d'analyse des matériaux actifs (Lama) et deux installations de traitement des effluents et des déchets nucléaires (STED). Le projet consistait à démanteler et à assainir ces six installations.

Les trois réacteurs ont été déclassés et démolis. Le Lama a été déclassé courant 2017 et les travaux d'assainissement de la STED sont en cours d'achèvement en vue de son déclassement.

Le centre de Grenoble consacre désormais l'essentiel de ses recherches au développement des nouvelles technologies, dans les domaines de l'énergie, de la santé, de l'information et de la communication.

LES ÉTABLISSEMENTS DE RECHERCHE (HORS CENTRES CEA)

Ce secteur d'activité regroupe tous les établissements publics ou privés à vocation de recherche, ainsi que les unités des

grands établissements ou des grands groupes industriels qui se consacrent, essentiellement ou exclusivement, à la recherche.

LES DÉCHETS QUI SERONT PRODUITS PAR L'INSTALLATION ITER

ITER est une installation de recherche internationale civile en cours de construction à Cadarache basée sur la fusion nucléaire. Elle utilise un concept de confinement magnétique qui consiste à enfermer un plasma, grâce à des champs magnétiques, dans une chambre à vide en forme d'anneau appelée « tokamak. » Le premier plasma est prévu pour fin 2025, les premiers déchets seront produits après 2030.

Les déchets générés par ITER seront constitués de déchets technologiques tels que les éléments issus du remplacement de certains composants de la machine lors de son fonctionnement ou encore des déchets de démantèlement. Ces déchets seront caractérisés par la présence de tritium, utilisé comme combustible, et de radionucléides issus de l'activation des parois de la chambre à vide par des neutrons de haute énergie.

Les quantités de déchets radioactifs qui seront générés lors de son fonctionnement sont estimées à environ 5 200 m³. Celles

générées par le démantèlement de l'installation à la fin de son exploitation sont évaluées à environ 30 000 m³ au total. Plus de 90 % d'entre eux seront des déchets TFA ou FMA-VC gérés dans le cadre des filières existantes.

Les déchets MA-VL seront traités, conditionnés et entreposés dans le cadre des filières qui seront mises en œuvre pour ce type de déchets, conformément à la réglementation. ITER ne produira aucun déchet de haute activité.

Des recherches sont actuellement prévues en vue de définir des matériaux à faible activation sous irradiation (comme l'eurofer), afin de réduire de manière significative la quantité de déchets produite. C'est l'objectif du programme IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*). Il s'agit d'un projet de recherche et développement faisant appel à une installation d'irradiation des matériaux qui sera construite au Japon.

De nombreux établissements publics ou privés utilisent des radionucléides. Globalement l'Andra a dénombré, à fin 2016, environ 500 producteurs dans le domaine de la recherche (hors CEA).

On peut citer notamment :

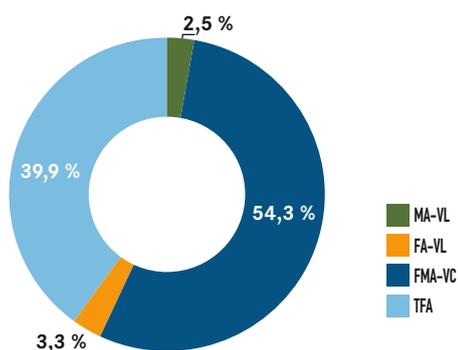
- des laboratoires de recherche médicale ou de l'Inserm, dépendant des facultés de médecine ou de pharmacie, et hébergés au sein des hôpitaux ou des CHU ;
- des laboratoires du CNRS ou des unités mixtes de recherche associées au CNRS, le plus souvent hébergés au sein de facultés, d'instituts ou de grandes écoles ;

- des unités de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3), dont les accélérateurs de particules d'Orsay et de Caen (Ganil) ;
- le réacteur de l'institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble et le Centre européen pour la recherche nucléaire (Cern) à la frontière franco-suisse ;
- des établissements du secteur privé comme Sanofi ou L'Oréal ;
- des réacteurs et des installations diverses arrêtés.

Dans le secteur de la biologie cellulaire et moléculaire, les radionucléides de durée de vie très courte servent à marquer des molécules auxquelles ils sont incorporés. Pour les radionucléides à vie courte, le tritium est souvent utilisé. Concernant les radionucléides à vie longue, c'est le carbone 14 qui sert fréquemment de marqueur. Ces radionucléides s'utilisent souvent sous forme de sources non scellées (c'est-à-dire de petits échantillons liquides). Après utilisation, ils deviennent des déchets liquides en général collectés par l'Andra qui les expédie pour traitement à Centraco de Cyclife.

Les déchets de période inférieure à 100 jours sont gérés sur place par décroissance de leur radioactivité.

► BILAN DES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR DE LA RECHERCHE



Catégorie	Volume à fin 2016 (m ³)
HA	161
MA-VL	10 700
FA-VL	13 900
FMA-VC	232 000
TFA	170 000
Total	~ 427 000

Les centres du CEA ont produit à fin 2016 près de 94 % des déchets du secteur de la recherche.

► BILAN DES MATIÈRES RADIOACTIVES DU SECTEUR DE LA RECHERCHE

Matières radioactives	Masse à fin 2016 (tML)
Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche	0,8
Autres combustibles usés civils	59
Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	14
Plutonium séparé non irradié, sous toutes ses formes physico-chimiques	2
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques	17
Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	7
Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	110

SECTEUR DE LA DÉFENSE

Ce secteur économique regroupe les activités des centres d'études, de recherche, de production ou d'expérimentations travaillant pour la force de dissuasion et celles des différentes armées (marine nationale, armée de l'air, armée de terre, etc.), du service de santé des armées (SSA), de la Direction générale de l'armement (DGA) et de la gendarmerie.

Les déchets HA et MA-VL de ce secteur sont produits exclusivement par les activités de la force de dissuasion.

LES CENTRES D'ÉTUDES, DE PRODUCTION OU D'EXPÉRIMENTATIONS TRAVAILLANT POUR LA FORCE DE DISSUASION

Il s'agit de toutes les activités liées à la force de dissuasion des centres de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA et des installations de la propulsion nucléaire de la DAM installées à Cadarache.

La DAM est, en outre, responsable de la maîtrise d'ouvrage pour la conception et le développement des chaufferies nucléaires des bâtiments de la marine nationale et pour la réalisation des cœurs équipant les chaufferies embarquées.

► LES INSTALLATIONS DU CEA/DAM

La Direction des applications militaires (DAM) du CEA conçoit, fabrique et maintient en condition opérationnelle les charges ou les têtes nucléaires du système de défense de la France. Elle assure également le démantèlement des armes nucléaires retirées du service.

Les sites concernés par les activités armes et chaufferies nucléaires sont des Installations nucléaires de bases secrètes (INBS) :

■ Le centre de Bruyères-le-Châtel

Depuis sa création, le site de Bruyères-le-Châtel a fabriqué les engins nucléaires expérimentés successivement au Sahara et dans le Pacifique entre 1960 et 1996, et a assuré le suivi des expérimentations et la recherche sur les matériaux constitutifs. Les installations de ce centre sont en cours de démantèlement et produisent essentiellement des déchets TFA et FMA-VC.

Quelques activités spécifiques limitées touchant à la physique et aux analyses subsistent sur le site.

■ Le centre de Valduc

Le centre de Valduc réalise certains éléments constitutifs des armes nucléaires. Il traite leurs matières radioactives (plutonium, uranium) et mène aussi des recherches sur les matériaux.

Ses activités produisent des déchets contaminés en émetteurs alpha d'une part et en tritium d'autre part. Les déchets MA-VL de Valduc sont des déchets technologiques divers conditionnés en fûts métalliques et expédiés vers Cadarache pour entreposage.

La plupart des colis de boues et de concentrats bloqués en fûts métalliques, produits autrefois par la station de traitement des effluents du centre ont été transférés pour être entreposés à Cadarache.

Les déchets FMA-VC sont constitués, d'une part, de déchets technologiques et métalliques divers conditionnés en fûts de 200 litres ou en caissons métalliques de 5 m³ et, d'autre part, d'effluents de l'installation.

Les déchets TFA produits sont essentiellement des déchets de fonctionnement.

Le centre de Valduc produit également des déchets tritiés dont les plus actifs et les plus dégazants sont conditionnés en fûts de 200 litres et entreposés sur le site de Valduc.

Le centre a engagé par ailleurs une phase d'assainissement pour certaines de ses installations.

■ Les autres centres

Des essais de détonique ont été réalisés jusqu'à fin 2013 à Moronvilliers. Ils utilisaient de l'uranium sous forme appauvrie en isotope 235. Le centre est maintenant dans une phase d'assainissement.

De même, des expérimentations en détonique ont été menées par le passé sur le centre du Cesta, utilisant aussi, pour certaines d'entre elles, de l'uranium sous forme appauvrie en isotope 235. Le Cesta a depuis plusieurs années pour mission première d'assurer l'architecture industrielle des armes de la force de dissuasion.

Se trouvent sur ces sites principalement des déchets TFA (déchets métalliques, déchets technologiques divers et déchets de démantèlement ou d'assainissement) contaminés en uranium.

Le centre de Gramat est un centre d'expertise de la défense en matière de vulnérabilité et d'efficacité des armements face aux agressions des armes nucléaires et conventionnelles. Ce centre d'essais utilisait aussi de l'uranium appauvri. Les déchets présents sur ce site sont des déchets TFA : déchets métalliques faiblement contaminés (aciers) et déchets de fonctionnement. Le centre est désormais dans une phase d'assainissement.

Enfin, les installations de la DAM à Cadarache au profit de la propulsion nucléaire, dont les réacteurs à terre, permettent de développer, de qualifier et de maintenir certains systèmes et équipements destinés aux chaufferies nucléaires des bâtiments de la marine.

► LES INSTALLATIONS ARRÊTÉES

Certaines installations exploitées par Orano pour le compte de la DAM sont arrêtées depuis 2009. Les déchets d'assainissement-démantèlement de ces installations sont, pour une part, des déchets tritiés comptabilisés dans les déchets FMA-VC.

Les déchets issus des opérations de retraitement des combustibles pour la force de dissuasion sont intégrés dans les bilans du présent paragraphe.

Depuis l'arrêt de la production de matières fissiles pour les besoins de la défense, ayant entraîné la fermeture des usines d'enrichissement et de recyclage, le CEA/DAM assure la maîtrise d'ouvrage du démantèlement de ces usines de Pierrelatte.

Par ailleurs le CEA/DAM assure la maîtrise d'ouvrage du démantèlement des réacteurs prototype à terre (PAT) et réacteur nouvelle génération (RNG) à Cadarache.

► LE CENTRE D'EXPÉRIMENTATION DU PACIFIQUE

Des déchets issus des expérimentations nucléaires passées sont stockés sur les sites de Mururoa, de Fangataufa et d'Hao en Polynésie française.



À fin 2016, le volume de déchets tritiés présents en France est de 5 600 m³ environ dont la majeure partie est générée par les activités liées à la force de dissuasion. Conformément au dossier d'orientation préconisant des solutions pour l'entreposage de déchets tritiés élaboré par le CEA dans le cadre du PNGMDR 2007-2009, le CEA/DAM a construit un premier entreposage à Valduc pour augmenter la capacité d'accueil des déchets tritiés des installations travaillant pour la force de dissuasion. Ce premier bâtiment a été mis en service en 2012.

LES ÉTABLISSEMENTS DE LA DÉFENSE NATIONALE

Ce domaine regroupe les activités professionnelles liées à la défense nationale (hors centres d'études, de production ou d'expérimentations travaillant pour la force de dissuasion traités précédemment) détenant des déchets radioactifs, qu'elles relèvent directement du ministère de la défense ou qu'elles travaillent pour son compte : armée de l'air, armée de terre, marine nationale, Direction générale de l'armement (DGA), Services de santé des armées (SSA) et gendarmerie nationale.

Il est à noter que, depuis le 1^{er} janvier 2009, la gendarmerie nationale ne dépend plus du ministère de la défense mais du ministère de l'Intérieur. Cependant, leurs typologies de déchets sont les mêmes que celles des autres états-majors. Dans la suite du chapitre, la gendarmerie est donc rattachée aux établissements de la défense nationale.

► LES MATÉRIELS RÉFORMÉS DES ARMÉES

Toutes les armées possèdent des matériels utilisant des propriétés de la radioactivité, notamment pour la vision nocturne.

Ces matériels usagés ou devenus obsolètes constituent des déchets, recensés dans chaque établissement de la défense nationale (une centaine de sites recensés).

Certaines pièces de moteur d'avions réformés, contenant du thorium, sont aussi recensées (carter en alliage magnésium/thorium par exemple).

Plusieurs établissements regroupent ces déchets pour centraliser et simplifier leur gestion. C'est le cas, par exemple, du site de Châteaudun pour l'armée de l'air.

À terme, il est prévu un seul centre de regroupement de déchets radioactifs interarmées : le site de Châteaudun.

► LES PORTS DE LA DÉFENSE NATIONALE

Les ports militaires de Brest/Île Longue, de Cherbourg et de Toulon produisent des déchets, pour la plupart de type TFA, en raison des opérations de construction, de fonctionnement, d'entretien et de démantèlement des chaufferies des sous-marins et du porte-avions.

Les tranches réacteurs des sous-marins en démantèlement sont entreposées à Cherbourg.

► LES ÉTABLISSEMENTS DGA

DGA détient sur son site de Bourges des déchets radioactifs qui résultent des expérimentations et des essais menés sur des armes contenant de l'uranium sous forme appauvrie en isotope 235.

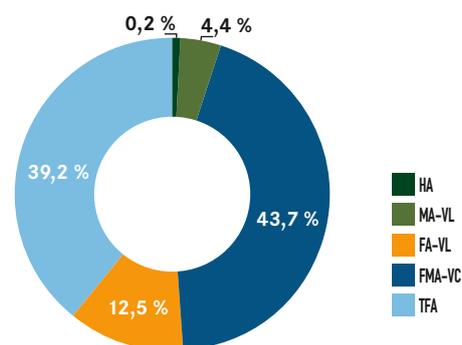
► LES DÉCHETS PRODUITS PAR LES ÉTABLISSEMENTS DE LA DÉFENSE NATIONALE

Un peu plus d'une cinquantaine de sites produisant et/ou détenant des déchets radioactifs a été répertoriée.

Il s'agit essentiellement de petits matériels réformés incorporant des peintures luminescentes au radium ou au tritium (boussoles, plaques, lignes de mire, cadrans, etc.).

La plupart de ces objets sont considérés comme des objets radioluminescents.

► BILAN DES DÉCHETS RADIOACTIFS DE LA DÉFENSE NATIONALE



Catégorie	Volume à fin 2016 (m ³)
HA	232
MA-VL	6 300
FA-VL	18 000
FMA-VC	63 100
TFA	56 500
Total	~ 144 000

Actuellement, la quasi-totalité des déchets tritiés est produite par le secteur de la défense.

► BILAN DES MATIÈRES RADIOACTIVES DU SECTEUR DE LA DÉFENSE

Matières radioactives	Masse à fin 2016 (t)
Combustibles usés de la défense nationale	177

SECTEUR DE L'INDUSTRIE NON-ÉLECTRONUCLÉAIRE

L'INDUSTRIE QUI UTILISE DES MATÉRIAUX NATURELLEMENT RADIOACTIFS POUR LEUR RADIOACTIVITÉ

Cette activité englobe la fabrication et l'utilisation des sources radioactives (scellées ou non scellées) hors du domaine médical.

Elle concerne également la fabrication et l'utilisation d'objets divers utilisant des produits radioactifs (paratonnerres radioactifs fabriqués entre 1932 et 1986 progressivement démontés et collectés par l'Andra, détecteurs de fumée, etc.) ou les propriétés de la radioactivité (contrôle de conformité de source, maintenance, etc.).

La durée de vie d'une source scellée est limitée et la rend inutilisable au bout de quelques mois ou de quelques années, en fonction de la période du radionucléide considéré. Les sources ne sont pas systématiquement considérées comme des déchets ultimes (voir dossier thématique 6).

Par ailleurs, l'article R. 4452-12 du Code du travail impose des contrôles techniques périodiques de radioprotection des sources scellées utilisées. Bon nombre de sources scellées repartent à l'étranger, vers leurs fournisseurs.

À noter que les déchets MA-VL affectés au secteur économique de l'industrie non-électronucléaire correspondent aux « blocs sources » contenant des sources scellées usagées.

Conformément à l'article R. 1333-161 du Code de la santé publique, « une source radioactive scellée est considérée comme périmée 10 ans au plus tard après la date du premier enregistrement apposé sur le formulaire de fourniture ou, à défaut, après la date de sa première mise sur le marché, sauf prolongation accordée par l'autorité compétente. Le silence gardé par l'Autorité de sûreté nucléaire pendant plus de six mois sur une demande de prolongation vaut décision de rejet de la demande. »

Les sources sont entreposées dans des locaux adaptés. Certaines pourraient être stockées au CSA dans la mesure où elles sont compatibles avec la sûreté du centre.

L'INDUSTRIE QUI UTILISE DES MATÉRIAUX NATURELLEMENT RADIOACTIFS POUR D'AUTRES PROPRIÉTÉS QUE LA RADIOACTIVITÉ

Ce secteur porte également sur les résidus de traitement de minerais et des sous-produits qui comportent une part significative de thorium et d'uranium. Les matières en suspension dans leur état actuel contiennent encore des matières radioactives.

Des activités liées à la chimie, à la métallurgie ou à la production d'énergie, manipulent des radionucléides contenus dans certaines matières premières minérales naturelles.

Elles peuvent ainsi être à l'origine de déchets radioactifs, essentiellement de faible ou très faible activité.

Certaines industries manipulent uniquement de la radioactivité naturelle, la nature des matériaux utilisés ou le procédé employé conduisant parfois à concentrer la radioactivité. C'est le cas par exemple de Solvay dans le domaine de l'extraction des terres rares.

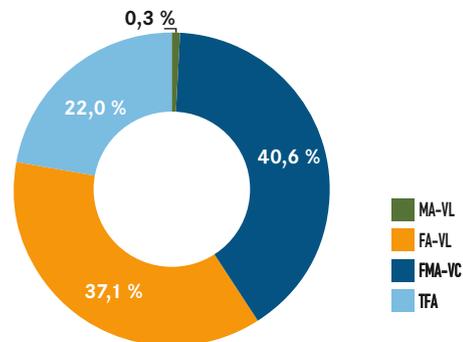
Les déchets produits peuvent présenter alors des niveaux de radioactivité suffisamment élevés pour imposer une gestion particulière. La réglementation prévoit pour ces cas une étude d'impact potentiel pour définir la filière adéquate, classique ou spécifique.

La totalité des industries susceptibles de produire de tels déchets radioactifs naturels est difficile à déterminer.

Les filières de gestion recensées à ce jour pour ce type de déchets sont le Cires, le futur centre de stockage FA-VL, les centres de stockage conventionnels lorsque l'étude d'impact a montré qu'il n'y a pas d'incidence sur l'homme et l'environnement.

Certains déchets ont été stockés par le passé à proximité des installations.

► BILAN DES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR INDUSTRIE NON-ÉLECTRONUCLÉAIRE



Catégorie	Volume à fin 2016 (m ³)
HA	-
MA-VL	161
FA-VL	20 300
FMA-VC	22 200
TFA	12 100
Total	~ 54 700

► BILAN DES MATIÈRES RADIOACTIVES DU SECTEUR INDUSTRIE NON-ÉLECTRONUCLÉAIRE

Matières radioactives	Masse à fin 2016 (tML)
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques	98
Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes	6 290
Matières en suspension (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)	5

SECTEUR MÉDICAL



Utilisation de produits radioactifs dans un laboratoire pharmaceutique

Ce secteur économique regroupe tous les établissements de statut public ou privé qui utilisent des radionucléides à des fins d'analyses ou de soins dans le domaine de la médecine.

Les centres de recherche médicale en sont exclus et appartiennent au secteur économique de la recherche.

Ce secteur recouvre principalement trois domaines :

- les analyses de biologie, effectuées *in vitro* sur des prélèvements biologiques dans un but de diagnostic ;
- les techniques d'imagerie médicale, utilisées en diagnostic ;
- les applications thérapeutiques, effectuées *in vitro* ou *in vivo*.

Les établissements relevant de ce secteur utilisent essentiellement des sources non scellées, c'est-à-dire des radionucléides contenus dans des solutions liquides.

Les services de médecine nucléaire et les laboratoires associés à la médecine nucléaire sont les plus grands utilisateurs de radionucléides.

Ces mêmes établissements emploient aussi des sources scellées, pour la radiothérapie, la curiethérapie et l'étalonnage des appareils de mesure de l'activité des produits injectés aux patients (voir dossier thématique 6).

Les déchets liquides produits sont gérés de deux manières différentes qui dépendent de la durée de vie des radionucléides qu'ils contiennent (voir dossier thématique 5) :

- décroissance sur place pour les très courtes durées ;
- traitement à Centraco de Cyclife puis stockage dans les centres de l'Andra pour les autres.

En dehors des sources, les déchets solides sont aussi gérés soit en décroissance sur place puis stockés dans des centres de stockage conventionnels, ou dans un centre Andra après traitement et conditionnement.

► BILAN DES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR MÉDICAL À FIN 2016

À fin 2016, le volume de déchets produits par ces activités médicales, en dehors des sources scellées usagées, est de l'ordre de 8 500 m³. La quasi-totalité de ces déchets est de catégorie FMA-VC et stockée au CSM de l'Andra.

Catégorie	Volume à fin 2016 (m ³)
HA	-
MA-VL	2
FA-VL	-
FMA-VC	8 410
TFA	88
Total	~ 8 500

Aucune matière radioactive du secteur du médical n'est déclarée à fin 2016.





LES INVENTAIRES PROSPECTIFS

PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS POUR LA DÉTERMINATION DES INVENTAIRES PROSPECTIFS	58
SR1 : renouvellement du parc électronucléaire par des EPR puis RNR	58
SR2 : renouvellement du parc électronucléaire bis par des EPR et RNR	58
SR3 : renouvellement du parc électronucléaire par des EPR uniquement	59
SNR : non-renouvellement du parc électronucléaire	61
SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS	63
ESTIMATION DES QUANTITÉS DE MATIÈRES ET DÉCHETS À DES DATES INTERMÉDIAIRES	66
Pour le scénario SR1	66
Pour le scénario SR2	68
LES VOLUMES DE DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT	69
Principes de gestion des déchets issus du démantèlement	69
Nature des déchets issus du démantèlement	69
Estimation des quantités de déchets issus du démantèlement	69

L'objectif des inventaires prospectifs est de donner une estimation des quantités de matières et de déchets radioactifs à différentes échéances de temps selon plusieurs scénarios. Ils visent à présenter les impacts sur les quantités de matières et de déchets radioactifs de différentes stratégies ou évolutions possibles de la politique énergétique française à long terme, sans présager des choix industriels qui pourraient être faits.



Conformément au décret n° 2008-875 du 29 août 2008 et à l'arrêté du 9 octobre 2008 modifié, les inventaires prospectifs de matières et déchets radioactifs sont déclarés par les producteurs ou détenteurs de matières et déchets radioactifs. De plus, contrairement aux stocks qui doivent être déclarés tous les ans par tous les détenteurs de déchets ou de matières, les prévisions ne sont requises que tous les trois ans et uniquement pour les exploitants d'INB, d'installations intéressant la défense (INBS, SIENID) ou d'ICPE dites « nucléaires » (rubriques de la nomenclature concernant les substances radioactives).

Seules les quantités de déchets et matières issus des installations (du fait de leur fonctionnement et de leur démantèlement) ayant obtenu leur décret d'autorisation de création au 31 décembre 2016 sont évaluées. Les matières et déchets radioactifs générés par le fonctionnement de nouveaux réacteurs venant en remplacement des réacteurs du parc électronucléaire actuel ne sont pas comptabilisés¹.

Estimer des quantités prospectives de déchets et de matières nécessite de formuler des hypothèses et de définir des scénarios.

Les scénarios répondent aux demandes du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) 2016-2018.

Conformément à la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, les scénarios tiennent compte d'une limitation de la puissance nucléaire installée de 63,2 GWe et d'une production électrique nette moyenne associée de 420 TWh/an (excepté le scénario SR2 dont la définition est antérieure à la loi TECV).

Les inventaires prospectifs ont été réalisés selon quatre scénarios contrastés d'évolution de la politique énergétique actuelle : trois scénarios de renouvellement du parc électronucléaire français actuel et un scénario de non-renouvellement. L'objectif de ces scénarios est d'encadrer et d'illustrer les évolutions possibles de politique énergétique en prenant en compte les incertitudes sans viser toutefois à établir une prédiction représentative. Ils illustrent donc d'une part la poursuite des tendances actuelles et d'autre part les conséquences de choix plus en rupture. Les scénarios de renouvellement supposent le déploiement de nouveaux réacteurs qui remplaceront les réacteurs du parc électronucléaire actuel, avec des hypothèses différentes sur le type de réacteur déployé. Les scénarios de renouvellement du parc postulent de fait l'existence de réacteurs capables de consommer le plutonium recyclé et non consommé par le parc actuel, à l'échéance du renouvellement du parc. Ils ne prennent pas en compte les quantités de matières et déchets radioactifs produits par ces nouveaux réacteurs puisque ceux-ci ne sont pas autorisés à fin 2016. Les scénarios de renouvellement prennent pour hypothèses différentes durées de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel. Ces hypothèses reflètent les orientations stratégiques d'EDF vis-à-vis de l'allongement de la durée de fonctionnement au-delà de 40 ans.

Le scénario de non-renouvellement correspond à l'arrêt de la production électronucléaire au bout de 40 ans de fonctionnement (60 ans pour l'EPR). Aucun réacteur ne sera déployé en remplacement des réacteurs du parc électronucléaire actuel.

RETRAIEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS

La politique énergétique française prévoit que les combustibles soient retraités après leur utilisation. Le retraitement aujourd'hui opéré à l'usine Orano de La Hague permet d'extraire environ 96 % de matières valorisables (plutonium et uranium) et environ 4 % de déchets radioactifs du combustible usé.

Le plutonium extrait sert à la fabrication du combustible MOX (combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium). Le mono-recyclage consiste à recycler une fois le plutonium dans les combustibles MOX, lesquels sont, après utilisation entreposés dans l'attente d'une valorisation ultérieure. En effet, le combustible MOX irradié déchargé des réacteurs REP contient encore une quantité significative de plutonium. Le multi-recyclage consiste à retraiter ce combustible irradié pour en extraire les matières valorisables puis refabriquer du combustible neuf et ce plusieurs

fois. Le multi-recyclage génère des déchets radioactifs qui devront faire l'objet d'un stockage.

Le multi-recyclage du plutonium ne peut être envisagé qu'avec le déploiement d'un parc de génération IV.



Site d'Orano La Hague

¹ Les estimations des quantités de matières et déchets radioactifs qui seraient produits par un nouveau parc électronucléaire font actuellement l'objet d'une étude menée par le CEA dans le cadre du PNGMDR 2016-2018.

Les producteurs-détenteurs ont estimé en ordre de grandeur, pour ces quatre scénarios, les quantités de déchets et de matières générés par l'ensemble des installations nucléaires (autorisées à fin 2016) jusqu'à leur fin de vie, c'est-à-dire jusqu'à la fin de leur démantèlement.

Les scénarios retenus s'appuient sur des hypothèses communes :

- les réacteurs électronucléaires du parc actuel sont au nombre de 59 : les 58 réacteurs de type REP en fonctionnement et le réacteur EPR en cours de construction sur le site de Flamanville dont la mise en service est prévue fin 2018 ;
- les scénarios prennent différentes hypothèses de durées de fonctionnement des réacteurs électronucléaires actuels. Ces hypothèses ne préjugent pas des décisions prises par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) à l'issue des processus de réexamen de sûreté de chacun des réacteurs, qui ont lieu pour chaque réacteur tous les 10 ans ;



Le terme « à terminaison » signifie à la fin du démantèlement des installations nucléaires autorisées à fin 2016 pour cette édition.

- le plutonium extrait lors du retraitement des combustibles usés est recyclé sous forme d'assemblages MOX réparti dans les 24 réacteurs de 900 MWe aujourd'hui autorisés à charger ce type de combustible et à terme dans des EPR (scénarios avec renouvellement du parc) ;
- pour les déchets liés à la conversion de l'uranium dans l'usine Orano de Malvési, les résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU) FA-VL qui seront produits à partir de 2019 ne sont pas pris en compte dans les inventaires prospectifs car le conditionnement de ces déchets n'est pas encore défini. Toutefois, les déchets TFA produits à partir de 2020 par l'usine Orano de Malvési sont pris en compte dans les inventaires prospectifs des déchets TFA.



Comme pour les stocks de déchets existants, l'unité adoptée pour les inventaires prospectifs de déchets est le « volume équivalent conditionné ».

PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS POUR LA DÉTERMINATION DES INVENTAIRES PROSPECTIFS

SR1 : RENOUVELLEMENT DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE PAR DES EPR PUIS RNR

Le scénario SR1 prend pour hypothèses la poursuite de la production d'électricité d'origine nucléaire et la poursuite du retraitement de combustibles usés (maintien de la stratégie actuelle). Il suppose que la totalité des combustibles consommés par les réacteurs électronucléaires du parc actuel est retraitée pour séparer les matières (uranium, plutonium) des déchets ultimes. Aucun combustible usé n'est alors stocké directement et tout le plutonium extrait des combustibles usés est recyclé, dans le parc actuel et dans un futur parc.

Les hypothèses structurantes retenues pour ce scénario sont :

- la poursuite de la production électronucléaire ;
- la durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel comprise entre 50 et 60 ans ;
- le renouvellement progressif des réacteurs du parc électronucléaire actuel par des réacteurs EPR puis par des réacteurs RNR qui pourraient constituer à terme la totalité d'un futur parc ;
- le retraitement de la totalité des combustibles usés, correspondant à la politique de gestion actuelle, incluant les combustibles usés RNR de Phénix et Superphénix, les combustibles EL4 d'EDF et les combustibles usés de la recherche et de la défense. Ceci suppose par convention :
 - la disponibilité des usines de retraitement du combustible permettant d'assurer ces opérations,
 - la séparation progressive des matières (comme actuellement) à mesure du besoin réel d'alimentation des nouveaux réacteurs, lequel dépendra directement du rythme de leur déploiement et de leur moxage,
 - la valorisation des matières issues du retraitement des combustibles usés UNE, uranium et plutonium, dans les réacteurs du parc actuel (réacteurs REP et EPR de Flamanville) ou dans les réacteurs EPR des futurs parcs. Le plutonium séparé issu du retraitement des combustibles usés est recyclé sous forme de combustibles MOX et l'uranium de retraitement issu du retraitement des combustibles usés sous forme de combustibles URE,
 - la valorisation des matières issues du retraitement des combustibles usés MOX et URE dans un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR) permettant ainsi le multi-recyclage.
- le flux de retraitement annuel des combustibles usés adapté au besoin du plutonium à recycler piloté par le nombre de réacteurs moxés ;
- la reprise progressive du recyclage de l'URT ;
- le recyclage de l'uranium appauvri dans les combustibles MOX ;
- le début de démantèlement du premier caisson réacteur UNGG d'EDF à l'horizon 2035.

ESTIMATION DES QUANTITÉS DE DÉCHETS RADIOACTIFS À TERMINAISON POUR LE SCÉNARIO SR1

Déchets radioactifs à terminaison, en m ³	
HA	12 000
MA-VL	72 000
FA-VL	190 000
FMA-VC	2 000 000
TFA	2 300 000
Total	4 500 000

Les hypothèses de retraitement de la totalité des combustibles usés et du déploiement de réacteurs EPR puis RNR supposent que toutes les matières sont valorisées. Aucune matière n'est donc requalifiée en déchet à terminaison.

Les matières issues du retraitement d'une partie des combustibles usés produits par le parc électronucléaire actuel seront valorisées dans un futur parc de réacteurs EPR puis RNR. Les quantités de combustibles usés produits par le parc actuel dont la matière sera valorisée dans un futur parc après retraitement sont de 20 000 tML pour le combustible UNE, 3 700 tML pour le combustible URE et 5 200 tML pour le combustible MOX.

SR2 : RENOUVELLEMENT DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE BIS PAR DES EPR ET RNR

Le scénario SR2 reprend les hypothèses et données du scénario de l'édition 2015 de l'Inventaire national. Comme le scénario SR1, il postule la poursuite de la production d'électricité d'origine nucléaire et le maintien de la stratégie actuelle en matière de retraitement-recyclage de combustibles usés. Il suppose que la totalité des combustibles consommés par les réacteurs électronucléaires du parc actuel est retraitée pour séparer les matières (uranium, plutonium) des déchets ultimes. Aucun combustible usé n'est alors stocké directement et tout le plutonium extrait des combustibles usés est recyclé dans le parc actuel et dans un futur parc.

Les hypothèses structurantes retenues pour ce scénario sont :

- la poursuite de la production électronucléaire ;
- contrairement au scénario SR1, la durée de fonctionnement uniforme de 50 ans de l'ensemble des réacteurs ;
- le renouvellement progressif des réacteurs du parc électronucléaire actuel par des réacteurs EPR puis par des réacteurs RNR qui pourraient constituer à terme la totalité d'un futur parc ;
- le retraitement de la totalité des combustibles usés, correspondant à la politique de gestion actuelle, incluant les combustibles usés RNR de Phénix et Superphénix, les combustibles EL4 d'EDF et les combustibles usés de la recherche et de la défense. Ceci suppose par convention :
 - la disponibilité des usines de retraitement du combustible

permettant d'assurer ces opérations,

- la séparation progressive des matières (comme actuellement) à mesure du besoin réel d'alimentation des nouveaux réacteurs, lequel dépendra directement du rythme de leur déploiement et de leur moxage,
 - la valorisation des matières issues du retraitement des combustibles usés UNE, uranium et plutonium, dans les réacteurs du parc actuel (réacteurs REP et EPR de Flamanville) ou dans les réacteurs EPR des futurs parcs. Le plutonium séparé issu du retraitement des combustibles usés est recyclé sous forme de combustibles MOX et l'uranium de retraitement issu du retraitement des combustibles usés sous forme de combustibles URE,
 - la valorisation des matières issues du retraitement des combustibles usés MOX et URE dans un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR) permettant ainsi le multi-recyclage.
- le flux de retraitement annuel des combustibles usés adapté au besoin du plutonium à recycler piloté par le nombre de réacteurs moxés ;
 - le recyclage de l'URT ;
 - le recyclage de l'uranium appauvri dans les combustibles MOX ;
 - le début de démantèlement des caissons réacteurs UNGG à l'horizon 2025¹.

► ESTIMATION DES QUANTITÉS DE DÉCHETS RADIOACTIFS À TERMINAISON POUR LE SCÉNARIO SR2

Déchets radioactifs à terminaison, en m ³	
HA	10 000
MA-VL	72 000
FA-VL ²	190 000
FMA-VC	1 900 000
TFA	2 200 000
Total	4 400 000

Les hypothèses de retraitement de la totalité des combustibles usés et du déploiement de réacteurs EPR puis RNR supposent que toutes les matières sont valorisées. Aucune matière n'est donc requalifiée en déchet à terminaison.

Les matières issues du retraitement d'une partie des combustibles usés produits par le parc électronucléaire actuel seront valorisées dans un futur parc de réacteurs EPR puis RNR.

SR3 : RENOUVELLEMENT DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE PAR DES EPR UNIQUEMENT

Le scénario SR3 prend pour hypothèse la poursuite de la production d'électricité d'origine nucléaire. Il suppose que la totalité des combustibles UNE utilisée dans les réacteurs électronucléaires du parc actuel est retraitée pour séparer les matières (uranium, plutonium) des déchets ultimes. Tout le plutonium extrait des combustibles UNE usés est recyclé, dans le parc actuel et dans un futur parc, sous forme de combustibles à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium. Les combustibles usés MOX et URE ne sont quant à eux pas retraités suite au non déploiement d'un parc RNR.

Les hypothèses structurantes retenues pour ce scénario sont :

- la poursuite de la production électronucléaire ;
- la durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel comprise entre 50 et 60 ans ;
- le renouvellement progressif des réacteurs du parc électronucléaire actuel par des réacteurs EPR seuls qui constitueraient à terme la totalité d'un futur parc ;
- le retraitement des combustibles usés UNE uniquement. Ceci suppose par convention :
 - la disponibilité des usines de retraitement du combustible permettant d'assurer ces opérations,
 - la valorisation des matières issues du retraitement des combustibles usés UNE, uranium et plutonium, dans les réacteurs du parc actuel (réacteurs REP et EPR de Flamanville) ou dans les réacteurs qui constitueront le futur parc (EPR). Le plutonium séparé issu du retraitement des combustibles usés est recyclé sous forme de combustibles MOX et l'uranium de retraitement issu du retraitement des combustibles est recyclé sous forme de combustibles URE,
 - les combustibles usés MOX et URE ne sont pas retraités (mono-recyclage). Les combustibles RNR de Superphénix et Phénix ne sont également pas retraités ;
- le flux de retraitement annuel des combustibles usés est adapté selon les besoins du plutonium à recycler ;
- la reprise progressive du recyclage de l'URT ;
- le début de démantèlement du premier caisson réacteur UNGG d'EDF à l'horizon 2035.

1 Depuis l'édition 2015 de l'Inventaire national, la nouvelle stratégie de démantèlement des réacteurs de type « UNGG » d'EDF pris en compte dans les scénarios SR1, SR3 et SNR conduit à décaler de plusieurs décennies le démantèlement de certains caissons de réacteurs, c'est pourquoi un décalage de 10 ans est observé avec le scénario SR2.
 2 La quantité de déchets FA-VL a été réévaluée depuis l'édition 2015.

► ESTIMATION DES QUANTITÉS DE DÉCHETS RADIOACTIFS ET DE MATIÈRES RADIOACTIVES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE REQUALIFIÉES EN DÉCHETS À TERMINAISON POUR LE SCÉNARIO SR3

Déchets radioactifs à terminaison, en m ³	
HA	9 400
MA-VL	70 000
FA-VL	190 000
FMA-VC	2 000 000
TFA	2 300 000
Total	4 500 000
Matières radioactives pouvant être requalifiées en déchets à terminaison, en tML	
Combustibles UNE usés	-
Combustibles URE usés	3 700
Combustibles mixtes uranium-plutonium usés	5 200
Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés	290
Rebuts de combustibles uranium non irradiés	-
Combustibles usés RNR	160
Autres combustibles usés civils	5
Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	-
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques ¹	-
Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	-
Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	-
Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	-
Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	470 000
Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxyde ²	4
Autres matières	70
Total	480 000

Dans ce scénario (renouvellement du parc se limitant au mono-recyclage), les matières qui seraient requalifiées en déchets devront faire l'objet d'un stockage :

- environ 3 700 tML de combustibles URE usés, 5 200 tML de combustibles MOX usés et 290 tML de rebuts MOX ;
- l'uranium appauvri issu de l'enrichissement de l'uranium extrait de la mine pourrait être considéré comme déchet à terminaison. Toutefois, tout (environ 470 000 tML) ou une partie de l'uranium appauvri serait potentiellement valorisable en France ou à l'étranger ;

- environ 100 tML de combustibles usés RNR provenant de Superphénix et 60 tML de combustibles usés RNR provenant de Phénix ;
- 70 tML du cœur neuf de Superphénix (catégorie « autres matières ») ;
- une petite part du thorium est non valorisable. Le reste du thorium (majeure partie) appartenant à Orano est considéré quant à lui entièrement valorisable.

Les matières qui seraient requalifiées en déchets devront être prises en charge dans des filières de gestion dédiées jusqu'à leur stockage.

1 Ne prend pas en compte l'uranium naturel extrait de la mine du secteur économique « industrie non-électronucléaire. »

2 Ne prend pas en compte le thorium du secteur économique « industrie non-électronucléaire. »

REQUALIFICATION DES MATIÈRES EN DÉCHETS RADIOACTIFS

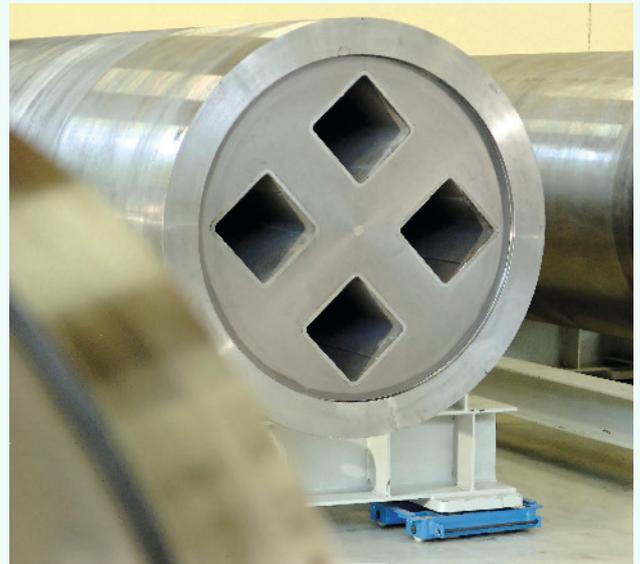
Le devenir des substances radioactives considérées comme des matières radioactives par leurs propriétaires doit être périodiquement examiné.

Dans l'hypothèse où les possibilités de valorisation d'une substance radioactive seraient remises en cause, il faut s'assurer que les garanties nécessaires, notamment financières, sont mises en place pour la prise en charge de ces substances dans des filières de gestion dédiées jusqu'à leur stockage.

Le cadre législatif permet notamment à l'État, après avis de l'ASN, de requalifier les matières radioactives en déchets radioactifs. Des études sont également périodiquement demandées pour examiner, à titre conservatoire, les filières possibles de gestion dans le cas où les matières seraient à l'avenir requalifiées en déchets, principalement dans l'hypothèse où les programmes électronucléaires ne seraient poursuivis ni en France ni à l'étranger.

Une réévaluation du caractère effectivement valorisable des matières radioactives a été demandée au titre du PNGMDR 2013-2015 et du décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 établissant ses prescriptions. Les propriétaires de matières radioactives, Orano, le CEA, EDF et Solvay, ont remis leur mise à jour des procédés de valorisation envisagés, en apportant notamment leur analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir. Ces éléments ont fait l'objet d'un avis par l'ASN et l'ASND¹.

Dans le cadre du PNGMDR 2016-2018, l'Andra doit approfondir, pour les combustibles usés, l'uranium appauvri, l'URT et le thorium, les études relatives au stockage de ces substances, dans les cas où elles seraient à l'avenir qualifiées de déchets, en lien avec les propriétaires de matières.



Démonstrateurs de conteneurs pour les combustibles usés exposés au CEA de Marcoule

SNR : NON-RENOUVELLEMENT DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE

Ce scénario prend pour hypothèse le non-renouvellement du parc existant à une échéance de 40 ans de fonctionnement (60 ans pour l'EPR). Il fixe comme objectif principal de ne pas produire, par le retraitement du combustible, du plutonium provenant du secteur électronucléaire qui ne pourrait être recyclé dans le parc actuel. Cette contrainte conduit donc à un arrêt anticipé des activités de retraitement des combustibles usés, afin de ne pas détenir de plutonium séparé.

Le recyclage du plutonium est limité à la fabrication du combustible MOX nécessaire au fonctionnement des réacteurs aujourd'hui autorisés à utiliser ce type de combustible.

Les hypothèses structurantes retenues pour ce scénario sont :

- l'arrêt de la production électronucléaire ;

- la durée de fonctionnement des 58 réacteurs REP de 40 ans et de 60 ans pour l'EPR de Flamanville ;
- le non-renouvellement des réacteurs du parc électronucléaire actuel ;
- l'arrêt anticipé du retraitement des combustibles usés UNE afin de ne pas détenir de plutonium séparé entraînant la cessation de toutes les opérations de retraitement des combustibles à l'usine d'Orano La Hague à courte échéance. Les combustibles UNE résiduels non retraités au terme de la durée de fonctionnement des réacteurs, ainsi que les combustibles URE et MOX non retraités seraient recatégorisés en déchets et supposés stockés en l'état ;
- pas de reprise du recyclage de l'URT ;
- le début de démantèlement du premier caisson réacteur UNGG d'EDF à l'horizon 2035.

¹ Avis n° 2016-AV-0256 de l'ASN du 9 février 2016 sur l'évaluation du caractère effectivement valorisable des matières radioactives est disponible sur le site Internet asn.fr. L'ASND a rendu son avis le 29 avril 2016.

► ESTIMATION DES QUANTITÉS DE DÉCHETS RADIOACTIFS ET DE MATIÈRES RADIOACTIVES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE REQUALIFIÉES EN DÉCHETS À TERMINAISON POUR LE SCÉNARIO SNR

Déchets radioactifs à terminaison, en m ³	
HA	4 200
MA-VL	61 000
FA-VL	190 000
FMA-VC	1 800 000
TFA	2 100 000
Total	4 200 000
Matières radioactives pouvant être requalifiées en déchets à terminaison, en tML	
Combustibles UNE usés	24 000
Combustibles URE usés	630
Combustibles mixtes uranium-plutonium usés	3 100
Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés	290
Rebuts de combustibles uranium non irradiés	-
Combustibles usés RNR	160
Autres combustibles usés civils	54
Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques ¹	2
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques ²	17
Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	7
Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	-
Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	34 000
Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	400 000
Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes ³	4
Autres matières	70
Total	460 000

Dans ce scénario (non-renouvellement du parc), les matières qui seraient requalifiées en déchets devront faire l'objet d'un stockage.

Tout le plutonium récupéré lors des opérations de retraitement des combustibles UNE est recyclé sous forme de combustibles MOX.

Environ 100 tML de combustibles usés RNR provenant de Superphénix et 60 tML de combustibles usés RNR provenant de Phénix ne seraient pas retraités. Les combustibles EL4 de Brennilis, environ 50 tML (la catégorie « autres combustibles usés civils ») ne seraient pas retraités et requalifiés en déchets.

De l'uranium appauvri, de l'uranium naturel, du plutonium et de l'URT pourraient être considérés comme des déchets à terminaison. Toutefois, l'uranium naturel et le plutonium seraient valorisables dans le parc actuel, avant l'arrêt des réacteurs. L'uranium appauvri et l'URT seraient potentiellement valorisables en France ou à l'étranger.

Une petite part du thorium est non valorisable. Le reste du thorium (majeure partie) appartenant à Orano est considéré quant à lui entièrement valorisable.

1 Provient du secteur de la recherche.

2 Ne prend pas en compte l'uranium naturel extrait de la mine du secteur économique « industrie non-électronucléaire. »

3 Ne prend pas en compte le thorium du secteur économique « industrie non-électronucléaire. »

SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS

Les matières sont associées à la catégorie de déchets avec laquelle elles présentent des typologies et des caractéristiques physico-chimiques comparables. Ceci ne présage pas, notamment pour l'uranium, de la solution de gestion qui sera retenue. Des

études sont en cours dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 sur les options de gestion dans les cas où l'uranium appauvri et l'URT seraient à l'avenir requalifiés de déchets.

	SR1	SR2'	SR3	SNR	
Poursuite ou arrêt de la production électronucléaire	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement de 50 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Arrêt au bout de 40 ans (sauf EPR au bout de 60 ans)	
Type de réacteurs déployés dans le futur parc	EPR puis RNR	EPR puis RNR	EPR	/	
Retraitement des combustibles usés	Tous : UNE, URE, MOX et RNR	Tous : UNE, URE, MOX et RNR	UNE seuls	Arrêt anticipé du retraitement des UNE	
Requalification des combustibles usés et de l'uranium en déchets	Aucune	Aucune	URE, MOX, RNR et uranium appauvri	Tous combustibles usés, uranium appauvri et URT	
HA	Combustibles usés à base d'oxyde d'uranium des réacteurs électronucléaires (UNE, URE)	-	-	3 700 tML	25 000 tML
	Combustibles usés à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium des réacteurs électronucléaires (MOX, RNR)	-	-	5 400 tML	3 300 tML
MA-VL	Déchets vitrifiés	12 000 m ³	10 000 m ³	9 400 m ³	4 200 m ³
	Déchets	72 000 m ³	72 000 m ³	70 000 m ³	61 000 m ³
	Déchets ^{2,3}	190 000 m ³	190 000 m ³	190 000 m ³	190 000 m ³
FA-VL	Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-	470 000 tML	400 000 tML
	Uranium issu du retraitement des combustibles usés sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-	-	34 000 tML
FMA-VC	Déchets	2 000 000 m ³	1 900 000 m ³	2 000 000 m ³	1 800 000 m ³
TFA⁴	Déchets	2 300 000 m ³	2 200 000 m ³	2 300 000 m ³	2 100 000 m ³



Les quantités de déchets sont exprimées en « volume équivalent conditionné ». Les quantités de matières sont exprimées en « tonne de métal lourd ». Les quantités de combustibles peuvent également être exprimées en « nombre d'assemblages » et représenteraient environ 20 000 assemblages à terminaison du scénario SR3 et 57 000 assemblages à terminaison du scénario SNR.

1 Les données pour SR2 ont été déclarées à fin 2013.

2 Ne prend pas en compte les déchets RTCU FA-VL qui seront produits à partir de 2019.

3 Valeur réévaluée depuis l'édition 2015 de l'Inventaire national.

4 Prend en compte les déchets TFA issus du traitement thermique des effluents nitrates à Malvési.

Les enseignements tirés de la comparaison des différents scénarios pour chaque catégorie sont expliqués ci-après. Ces enseignements sont par nature directement liés aux hypothèses structurantes des scénarios et en particulier à la non prise en compte des quantités de déchets produits par les potentiels futurs parcs sous-jacents aux scénarios SR1, SR2 et SR3.

Certaines hypothèses prises dans le scénario SR2 (établies à fin 2013) ont pu depuis évoluer, ce qui peut rendre difficile la comparaison des scénarios SR1, SR3 et SNR avec le scénario SR2.

HA LES DÉCHETS DE HAUTE ACTIVITÉ

La durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel et la poursuite du retraitement des combustibles usés a un impact direct sur la quantité de déchets vitrifiés. Logiquement, plus le parc fonctionne longtemps, plus il y a de combustibles à retraiter et plus le volume de déchets vitrifiés à terminaison est élevé.

Les combustibles usés du parc, du fait de leurs caractéristiques, s'ils n'étaient pas retraités, pourraient s'apparenter à des déchets de haute activité.

La nature et la quantité de déchets à terminaison du parc actuel peuvent être impactées par :

- le renouvellement ou non du parc existant ;
- dans le cas des scénarios de renouvellement, le type de réacteurs qui seront déployés en remplacement des réacteurs actuels.

Ainsi :

- dans l'hypothèse d'un renouvellement du parc par des EPR puis des RNR (scénarios SR1 et SR2), seuls les déchets vitrifiés issus du retraitement des combustibles usés sont présents à terminaison ;
- dans l'hypothèse d'un renouvellement du parc avec des EPR uniquement (scénario SR3), le retraitement des combustibles UNE produit des déchets vitrifiés. Les combustibles URE et MOX ne sont pas retraités, aucun déchet vitrifié issu de leur retraitement n'est donc produit. Le volume de déchets vitrifiés à terminaison est donc inférieur au volume de déchets vitrifiés des scénarios SR1 et SR2, mais les combustibles usés URE et MOX seraient requalifiés en déchets dans le scénario SR3 ;
- dans l'hypothèse d'un scénario de non-renouvellement du parc électronucléaire (scénario SNR), l'arrêt anticipé du retraitement des combustibles usés UNE entraîne un arrêt anticipé de la production des déchets vitrifiés et donc une quantité plus faible de déchets vitrifiés. En contrepartie, les combustibles usés UNE, URE et MOX feraient l'objet d'un stockage puisqu'ils seraient requalifiés en déchets.

MA-VL

LES DÉCHETS DE MOYENNE ACTIVITÉ À VIE LONGUE

La durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel et la poursuite du retraitement des combustibles usés a un impact direct sur la quantité de déchets MA-VL. Ainsi, une augmentation de la durée de fonctionnement entraîne une augmentation de la quantité de déchets MA-VL.

La prise en compte du retour d'expérience depuis l'édition 2015 de la production des colis de déchets compactés (CSD-C) d'Orano La Hague dans les scénarios SR1, SR3 et SNR se traduit par une diminution du volume de déchets MA-VL¹. De plus, les prévisions de production des colis de déchets solides d'exploitation cimentés produits depuis 1994 (CBF-C²) à l'usine d'Orano La Hague ont été revues à la baisse dans les scénarios SR1, SR3 et SNR².

La nature et la quantité de déchets à terminaison du parc actuel peuvent être impactées par :

- le renouvellement ou non du parc existant ;
- dans le cas des scénarios de renouvellement, le type de réacteurs qui seront déployés en remplacement des réacteurs actuels.

FA-VL

LES DÉCHETS DE FAIBLE ACTIVITÉ À VIE LONGUE

La production de déchets FA-VL est fonction du démantèlement d'installations existantes. Leur volume à terminaison est donc indépendant des scénarios liés aux inventaires prospectifs.

Du fait de sa typologie, l'uranium appauvri pourrait s'apparenter à un déchet de la catégorie FA-VL s'il était requalifié en déchet. Les scénarios SR1 et SR2 prennent pour hypothèses que tout l'uranium appauvri est valorisable. Dans les scénarios SR3 et SNR tout ou partie de l'uranium appauvri pourrait être requalifié en déchet à terminaison. Les opérations d'enrichissement de l'uranium naturel sont poursuivies dans le scénario SR3, ce qui entraîne une augmentation de la quantité d'uranium appauvri. Ce stock pourrait fournir à la France, après ré-enrichissement, une source potentielle d'UNE pour alimenter les réacteurs selon les conditions économiques. L'arrêt de la production électronucléaire supposé dans le scénario SNR, entraîne un arrêt de la fabrication des combustibles ce qui engendre la non valorisation de l'uranium appauvri. Ce stock pourrait éventuellement être valorisable à l'étranger.

L'uranium issu du retraitement des combustibles usés, du fait de sa typologie, pourrait s'apparenter à un déchet de la catégorie FA-VL s'il était requalifié en déchet. Dans les scénarios SR1, SR2 et SR3, l'uranium issu du retraitement des combustibles usés est supposé valorisable dans les combustibles URE. L'arrêt du nucléaire entraîne un arrêt définitif du recyclage de l'URT et par conséquent la non valorisation de l'URT. Toutefois, ce stock pourrait éventuellement être valorisable à l'étranger.

1 Les productions prévisionnelles de colis de déchets compactés sont estimées à partir d'un ratio de production (nombre de CSD-C par tonne de métal lourd retraitée). Dans les scénarios SR1, SR3 et SNR, ce ratio a été réévalué et prend en compte le retour d'expérience acquis par Orano sur la production des colis CSD-C.

2 Il s'agit d'un objectif industriel pour Orano.



LES DÉCHETS DE FAIBLE ET MOYENNE ACTIVITÉ À VIE COURTE, ET DE TRÈS FAIBLE ACTIVITÉ

Le volume de déchets FMA-VC et TFA produits est directement lié à la durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel. Une augmentation de la durée de fonctionnement entraîne une augmentation du volume de déchets produits.

LES DÉCHETS DE MALVÉSI

Les déchets provenant de l'usine d'Orano à Malvési sont affichés séparément dans les bilans chiffrés des prévisions dans l'attente d'une décision sur la gestion à long terme de ces déchets.

BILAN ET PRÉVISIONS DES VOLUMES DE DÉCHETS ENTREPOSÉS SUR LE SITE DE MALVÉSI (m³)¹

	À fin 2016	À fin 2030	À fin 2040
Boues des bassins de décantation	70 400	0	0
RTCU historique	282 000	310 000	310 000
RTCU FA-VL	0	24 000	40 000
Effluents nitratés	374 000	200 000	110 000

Les évolutions des volumes s'expliquent par :

- la vidange des boues présentes dans les bassins de décantation sur la période 2017 - 2030. Après traitement, les boues déshydratées seront recatégorisées en RTCU FA-VL et seront entreposées sur le site de Malvési dans l'attente d'une filière de gestion ;
- l'arrêt de la production de RTCU historique à compter de 2019. La recherche d'une filière de gestion à long terme sur le site de Malvési est en cours pour ces déchets ;
- la production de RTCU à partir de 2019 qui relèveront, après traitement et conditionnement, de la filière de gestion FA-VL ;

- le traitement par un procédé thermique des futurs effluents liquides de procédé conjointement à ceux déjà entreposés dans les bassins de décantation (effluents nitratés) à partir de 2020 entraînant une réduction de leur volume et la production de déchets TFA (non pris en compte ici mais pris en compte dans les prévisions TFA).



Entrée de l'usine Orano à Malvési

¹ Les quantités sont exprimées en volume brut et non en volume équivalent conditionné.

ESTIMATION DES QUANTITÉS DE MATIÈRES ET DÉCHETS À DES DATES INTERMÉDIAIRES

La réglementation impose aux détenteurs d'estimer les quantités de matières et déchets radioactifs à des dates spécifiques. Pour les deux scénarios de renouvellement du parc électronucléaire avec déploiement de réacteurs EPR puis RNR, des estimations de quantités de déchets et de matières sont également réalisées à des dates intermédiaires : fin 2030 et fin 2040 pour le scénario SR1 ; fin 2020 et fin 2030 pour le scénario SR2.

Ces estimations sont issues des déclarations des producteurs et détenteurs de matières et déchets radioactifs. Elles ne prennent pas en compte :

- les déchets qui seraient produits par un nouveau parc électronucléaire ;
- la valorisation des matières radioactives du parc actuel dans un futur parc ;
- les matières radioactives qui seraient générées par un futur parc.

La poursuite de la production électronucléaire engendre une augmentation du volume de déchets radioactifs. Cette augmentation est modulée par :

- la diminution de la production annuelle de déchets HA et MA-VL en raison de la mise à l'arrêt progressive des réacteurs électronucléaires du parc actuel, entraînant la diminution de la quantité de combustibles UNE utilisés dans les réacteurs actuels et par conséquent la diminution de la quantité de combustibles UNE du parc actuel retraités ;
- l'augmentation du volume de déchets FA-VL liée au démantèlement des caissons réacteurs UNGG qui débutera en 2035 et se poursuivra au-delà de 2040 ;
- l'augmentation de la production de déchets FMA-VC et TFA en raison du démantèlement des réacteurs du parc électronucléaire actuel mais également des usines et ateliers supports.

POUR LE SCÉNARIO SR1

► ESTIMATION DES VOLUMES DE DÉCHETS À DES DATES INTERMÉDIAIRES POUR LE SCÉNARIO SR1 (m³)

Catégorie	Stocks à fin 2016	Prévisions à fin 2030	Prévisions à fin 2040	Prévisions à terminaison du parc actuel
HA	3 650	5 700	6 900	12 000
MA-VL	45 000	51 000	58 000	72 000
FA-VL	90 500	110 000	120 000	190 000
FMA-VC	917 000	1 200 000	1 500 000	2 000 000
TFA	482 000	970 000	1 600 000	2 300 000
Total	1 540 000	2 300 000	3 300 000	4 500 000

► ESTIMATION DES QUANTITÉS DE MATIÈRES À DES DATES INTERMÉDIAIRES POUR LE SCÉNARIO SR1 (EN tML, EXCEPTÉ POUR LES COMBUSTIBLES USÉS DE LA DÉFENSE NATIONALE EN TONNES D'ASSEMBLAGES)

Matières radioactives	Stocks à fin 2016	Prévisions à fin 2030	Prévisions à fin 2040
Combustibles UNE avant utilisation	448	370	270
Combustibles UNE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	4 450	3 700	2 700
Combustibles UNE usés, en attente de retraitement	11 400	11 000	10 000
Combustibles URE avant utilisation	-	60	60
Combustibles URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	53	620	620
Combustibles URE usés, en attente de retraitement	578	800	2 200
Combustibles mixtes uranium-plutonium avant utilisation ou en cours de fabrication	38	50	30
Combustibles mixtes uranium-plutonium en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	430	520	300
Combustibles mixtes uranium-plutonium usés, en attente de retraitement	1840	3 600	4 700
Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement	267	310	290
Rebuts de combustibles uranium non irradiés en attente de retraitement	-	-	-
Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	120	120	110
Combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation	-	0,1	0,1
Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche	0,8	0,1	0,1
Autres combustibles usés civils	59	57	56
Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	54	28	38
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques	29 900	22 000	22 000
Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	3 860	1 300	1 300
Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-	-
Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	29 600	38 000	33 000
Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	310 00	400 000	470 000
Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes	8 570	8 600	8 600
Matières en suspension (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)	5	5	-
Autres matières	70	70	70
Combustibles usés de la défense nationale	177	260	340

L'évolution des quantités de combustibles UNE et mixtes uranium-plutonium avant utilisation et en cours d'utilisation dans le parc actuel entre 2016 et 2040 s'explique par l'arrêt progressif des réacteurs du parc électronucléaire et donc la diminution du nombre de combustibles UNE et mixtes uranium-plutonium en cours d'utilisation dans ces réacteurs.

La poursuite du retraitement des combustibles usés (maintien de la stratégie actuelle) entraîne une stabilisation sur la période 2016-2040 de la quantité de combustibles UNE usés, en attente de retraitement. Les combustibles mixtes d'uranium et de plutonium usés seront quant à eux entreposés dans l'attente d'une valorisation dans un futur parc RNR, ce qui se traduit par une augmentation de leur quantité entre 2016 et 2040.

L'augmentation de la quantité des combustibles URE avant utilisation et en cours d'utilisation dans les réacteurs électronucléaires entre 2016 et 2040 est due à la reprise progressive de l'utilisation des combustibles URE dans les réacteurs EDF. Cette reprise a un impact direct sur la quantité d'uranium issue de retraitement des combustibles usés, qui une fois enrichi est utilisé dans la fabrication des combustibles URE. Ainsi, l'augmentation du stock d'uranium issu du retraitement des combustibles usés devient de plus en plus faible, puis le stock diminue. La reprise progressive de l'utilisation des combustibles URE dans les réacteurs EDF implique également une augmentation de la quantité de combustibles usés URE qui pourrait être après retraitement, valorisée dans un futur parc RNR.

Les rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement ont vocation à être traités puis recyclés dans le parc actuel ou futur d'où les variations observées.

La poursuite de la production nucléaire se traduit notamment par la poursuite de l'enrichissement d'uranium. La quantité d'uranium appauvri en entreposage continue d'augmenter entre 2016 et 2040. L'uranium appauvri pourrait être valorisé dans des réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides.

Les quantités d'uranium naturel enrichi et d'uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques reviennent à l'équilibre sur la période 2016 et 2030 puis sont maintenues à l'équilibre.

La baisse de la quantité de plutonium entre 2017 et 2030 est due à la fabrication et à l'expédition de combustibles MOX vers l'étranger. Le recyclage du plutonium dans les futurs réacteurs pas encore autorisés à fin 2016 n'étant pas pris en compte, la quantité de plutonium augmente entre 2030 et 2040.

Concernant les « autres combustibles usés civils », l'évolution entre le stock à fin 2016 et celui à fin 2030 est due au retraitement des derniers cœurs des réacteurs de recherche Osiris, Isis et Orphée.

Les matières en suspension (contenant des oxydes de terres rares et des traces de thorium et d'uranium) sont valorisées sur la période 2030-2040.

POUR LE SCÉNARIO SR2

Les données du scénario de l'édition 2015 de l'Inventaire national (scénario SR2 dans le présent inventaire), postulant la poursuite de la production électronucléaire avec une durée de fonctionnement uniforme de 50 ans de l'ensemble des réacteurs, sont rappelées ci-après.

ESTIMATION DES VOLUMES DE DÉCHETS À DES DATES INTERMÉDIAIRES POUR LE SCÉNARIO SR2 (m³)

Catégorie	Prévisions à fin 2020	Prévisions à fin 2030	Prévisions à terminaison
HA	4 100	5 500	10 000
MA-VL	48 000	53 000	72 000
FA-VL	92 000	120 000	190 000
FMA-VC	1 000 000	1 200 000	1 900 000
TFA	650 000	1 100 000	2 200 000
Total	1 800 000	2 500 000	4 400 000

ESTIMATION DES QUANTITÉS DE MATIÈRES À DES DATES INTERMÉDIAIRES POUR LE SCÉNARIO SR2 (EN tML, EXCEPTÉ POUR LES COMBUSTIBLES USÉS DE LA DÉFENSE NATIONALE EN TONNES D'ASSEMBLAGES)

Matières radioactives	Prévisions à fin 2020	Prévisions à fin 2030
Combustibles UNE avant utilisation	440	420
Combustibles UNE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	4 600	3 700
Combustibles UNE usés, en attente de retraitement	11 000	11 000
Combustibles URE avant utilisation	-	20
Combustibles URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	-	290
Combustibles URE usés, en attente de retraitement	530	1 200
Combustibles mixtes uranium-plutonium avant utilisation ou en cours de fabrication	45	45
Combustibles mixtes uranium-plutonium en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	490	390
Combustibles mixtes uranium-plutonium usés, en attente de retraitement	2 500	3 900
Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement	240	200
Rebuts de combustibles uranium non irradiés en attente de retraitement	-	-
Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	150	100
Combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation	0,2	0,3
Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche	0,1	0,1
Autres combustibles usés civils	75	77
Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	33	39
Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques	25 000	25 000
Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	960	960
Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-
Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	34 000	44 000
Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	330 000	410 000
Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes	8 500	8 400
Matières en suspension (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)	3	-
Autres matières	72	72
Combustibles usés de la défense nationale ¹	200	260

¹ Les quantités de combustibles usés de la défense nationale ont été actualisées à fin 2016.

LES VOLUMES DE DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT

Comme l'industrie électronucléaire est une industrie relativement récente (née au début des années 1960), les principaux chantiers de démantèlement des installations nucléaires du cycle du combustible ainsi que les centres nucléaires de production d'électricité sont à venir. Le démantèlement d'une installation nucléaire constitue une source conséquente de déchets radioactifs ; l'optimisation de leur gestion et notamment la réduction de leur volume représentent un enjeu majeur pour les années à venir. Les déchets induits par les opérations de démantèlement sont de deux types : conventionnels ou radioactifs. Pour identifier les déchets qui relèvent de l'une ou l'autre de ces catégories, les installations sont délimitées en zones, qui prennent en compte l'historique de l'installation et les opérations qui y ont été conduites :

- les déchets issus de zones à déchets conventionnels (ZDC) sont des déchets non radioactifs, qui sont donc éliminés après contrôle vers des filières agréées conventionnelles ;
- les déchets issus des zones à production possible de déchets nucléaires (ZppDN) sont tous gérés comme s'ils étaient radioactifs, même si aucune radioactivité n'y est détectée, et sont conditionnés et caractérisés pour une prise en charge par l'Andra en vue de leur gestion à long terme.

Le zonage déchets peut être revu entre le fonctionnement et le démantèlement de l'installation pour prendre en compte les spécificités des différentes phases de l'exploitation et permettre une gestion optimisée des déchets.



Démantèlement de la centrale Chooz A

PRINCIPES DE GESTION DES DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT

La politique de gestion des déchets radioactifs du démantèlement s'appuie, comme pour les autres déchets, sur :

- la garantie de la traçabilité des déchets issus des installations nucléaires (zonage déchets, caractérisation, contrôle) ;

- la minimisation du volume des déchets produits ;
- l'optimisation de leur catégorisation ;
- l'envoi en ligne des déchets vers les centres de stockage existants. Dans le cas où les déchets ne disposent pas d'exutoire, ceux-ci sont entreposés dans des installations dédiées.

NATURE DES DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT

Les déchets de démantèlement sont en grande partie des déchets conventionnels, notamment des gravats et des métaux. Par exemple, dans le cas de la déconstruction de la centrale nucléaire de Chooz A, 80 % des 40 000 tonnes de déchets produits sont conventionnels et seulement 20 % radioactifs.

Les déchets radioactifs de démantèlement sont majoritairement (> 99 %) de très faible activité (TFA) et de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Il s'agit :

- des matériaux liés à la démolition des installations (béton, gravats, ferrailles, parois de boîtes à gants, tuyauteries, etc.) ;
- des équipements de procédés (pièces métalliques par exemple) ;
- des outils et tenues de travail (gants, tenues vinyle, etc.) ;
- des effluents qui ont servi au rinçage d'équipements.

Il s'y ajoute des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), notamment les déchets de graphite provenant de la filière française de réacteurs de première génération dite « uranium naturel graphite gaz » (UNGG) et des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en faible quantité (il s'agit principalement de déchets activés, dont des pièces métalliques situées au cœur des réacteurs).

Les déchets radioactifs issus du démantèlement sont gérés de la même manière que les déchets de fonctionnement des installations. Ils sont triés, subissent éventuellement un traitement puis sont conditionnés (*voir dossier thématique 2*), avant d'être transportés vers les centres de stockage existants adaptés à leur niveau de radioactivité (respectivement Cires pour les déchets TFA et CSA pour les déchets FMA-VC) ou entreposés en attente de l'ouverture de la filière de stockage adéquate.

ESTIMATION DES QUANTITÉS DE DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT

Lors de la préparation des opérations de démantèlement, la quantité et la nature des déchets qui seront produits sont évaluées de la façon la plus précise possible, et les moyens de traitement et de conditionnement à mettre en œuvre sont définis. Ces évaluations prennent en compte la totalité des déchets produits par l'opération, y compris les déchets secondaires induits, par exemple les volumes d'effluents engendrés par la décontamination.

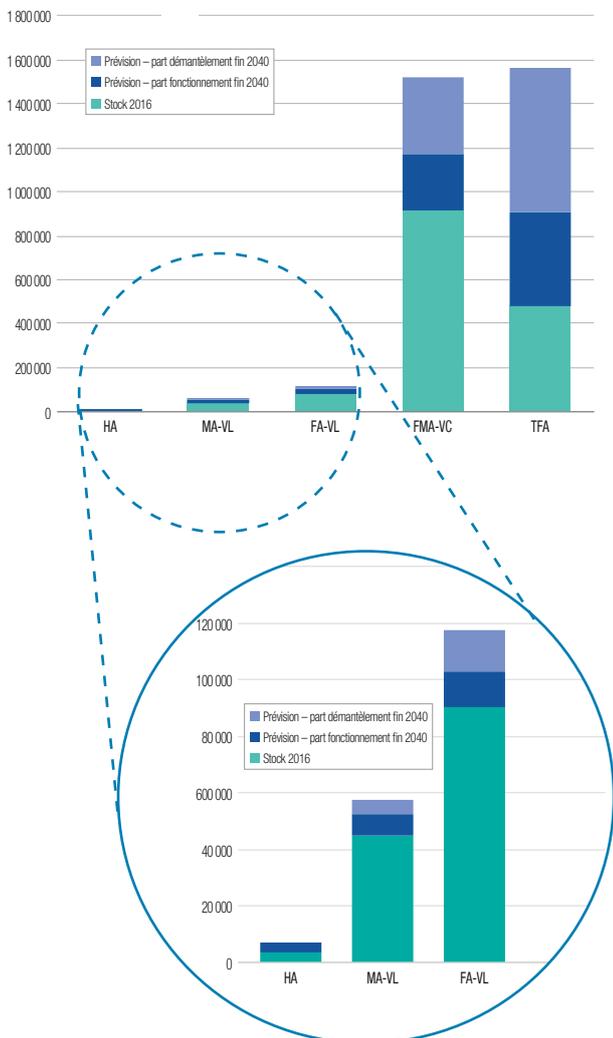
Pour ce faire, en premier lieu, un inventaire rigoureux des installations à assainir, des équipements qu'elles contiennent et de leur niveau de contamination résiduelle est réalisé, ce qui

requiert une bonne connaissance de l'historique de l'exploitation de l'installation.

Les quantités de déchets qui seront produites sont alors évaluées en utilisant des « ratios techniques » qui ont été établis et sont régulièrement mis à jour sur la base du retour d'expérience des opérations de démantèlement déjà réalisées. Ces ratios permettent de calculer la quantité de déchets issue du démantèlement de chaque partie d'une installation en fonction de la nature et des caractéristiques techniques de celle-ci et des mesures de contamination radiologique qui y ont été réalisées (voir dossier thématique 3).

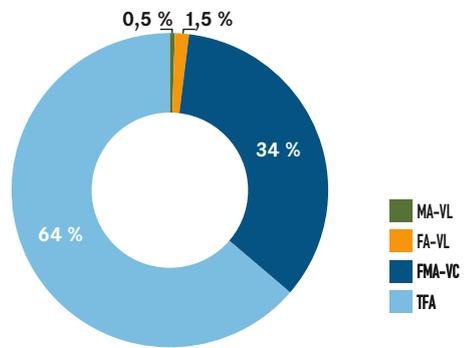
Les graphiques ci-dessous présentent les quantités prévisionnelles de déchets à fin 2040 pour le scénario SR1 en fonction des catégories en distinguant les stocks de déchets produits à fin 2016, les prévisions de déchets issus du démantèlement et les prévisions de déchets issus du fonctionnement des installations.

► PRÉVISIONS DES QUANTITÉS DE DÉCHETS À FIN 2040 POUR LE SCÉNARIO SR1



Le graphique ci-après présente la répartition entre les différentes catégories des déchets de démantèlement produits entre 2017 et 2040. La majorité des déchets radioactifs issus des opérations de démantèlement est de catégorie TFA, et dans une moindre mesure de catégorie FMA-VC. Dans certains cas particuliers et en fonction de la nature de l'installation, ils peuvent également relever de la catégorie MA-VL. Le démantèlement des réacteurs UNGG produira des déchets FA-VL.

► PRODUCTION DE DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT DE DÉBUT 2017 À FIN 2040







LES MODES DE GESTION SPÉCIFIQUES

LA GESTION DES SITUATIONS HISTORIQUES	74
Les stockages historiques de déchets radioactifs dans les installations de stockage de déchets conventionnels	74
Les stockages historiques de déchets situés au sein ou à proximité d'installations nucléaires de base et de base secrète	76
Les dépôts historiques de déchets à radioactivité naturelle élevée	78
Les stockages de la défense en Polynésie française	79
L'immersion des déchets	79
LA GESTION DES RÉSIDUS DE TRAITEMENT DES MINES D'URANIUM	80
LA GESTION ACTUELLE DES DÉCHETS À RADIOACTIVITÉ NATURELLE ÉLEVÉE	82

Certains déchets radioactifs font l'objet de modes de gestion spécifiques.

Il peut s'agir :

- de déchets radioactifs dont les choix de gestion ont été faits à l'époque où ils ont été produits et qui ont, depuis, évolué. Il s'agit des situations historiques. Ces déchets ont pu être stockés au sein ou à proximité d'installations nucléaires, dans des installations de stockage de déchets conventionnels, sur d'anciens sites industriels ou encore en activité ou à proximité de ces sites, ou immergés ;
- des résidus de traitement des mines d'uranium, qui, du fait de leur volume important, font l'objet d'une gestion *in situ* ;
- des déchets à radioactivité naturelle élevée qui, selon leurs caractéristiques radiologiques, peuvent faire l'objet d'un stockage *in situ*, être valorisés, être évacués dans des centres de stockage de déchets conventionnels ou dans les centres de stockage de l'Andra.

Tous les sites sur lesquels sont stockés les déchets radioactifs (hors zones d'immersion internationales) font l'objet d'une surveillance environnementale adaptée, qui permet de vérifier que l'impact lié à ces déchets est négligeable, ou, dans le cas contraire, de prendre les mesures adéquates de protection de l'environnement et des populations.

Les sites mentionnés ici sont référencés dans *L'Inventaire géographique*. Les quantités de déchets présentées dans ce chapitre ne sont pas incluses dans les bilans présentés dans les chapitres 2 et 3 car les déchets correspondants n'ont pas vocation à être pris en charge dans les centres de stockage de l'Andra en exploitation ou en projet, de par leur statut historique et du fait qu'ils sont déjà gérés.

LA GESTION DES SITUATIONS HISTORIQUES

Certains déchets radioactifs ont pu, par le passé, faire l'objet de modalités de gestion qui ont, depuis, évolué.

Des déchets radioactifs ont été stockés par leur producteur ou détenteur sur des sites qualifiés de « stockages historiques » qui ne sont pas sous la responsabilité de l'Andra.

Il s'agit notamment :

- des installations de stockage de déchets conventionnels ayant reçu des déchets TFA provenant de l'industrie conventionnelle ou nucléaire ;
- des stockages de déchets situés au sein ou à proximité d'installations nucléaires ;
- des dépôts de déchets à radioactivité naturelle élevée sur d'anciens sites industriels ou encore en activité ou à proximité de ces sites ;
- des stockages de la défense en Polynésie française ;
- des zones d'immersion des déchets.

LES STOCKAGES HISTORIQUES DE DÉCHETS RADIOACTIFS DANS LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DÉCHETS CONVENTIONNELS

Des centres de stockage de déchets conventionnels ont reçu, régulièrement ou occasionnellement, des déchets comportant de très faibles quantités de radioactivité avoisinant quelques becquerels par gramme. Il s'agit essentiellement de boues, de terres, de résidus industriels, de gravats et de ferrailles provenant de l'industrie conventionnelle ou de l'industrie nucléaire civile ou militaire.

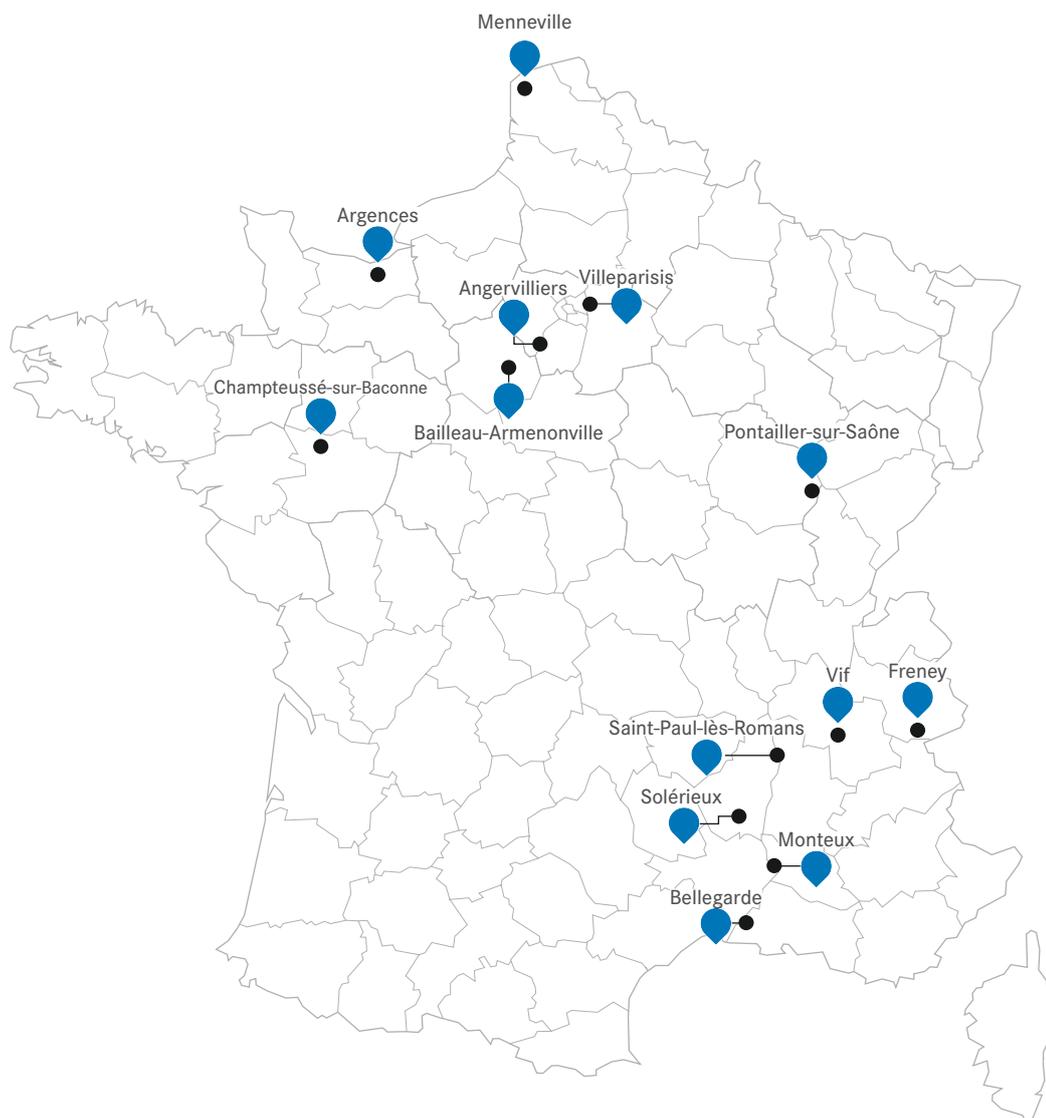
Le stockage de déchets radioactifs dans des installations de stockage de déchets conventionnels est interdit, depuis 1997 pour les installations de stockage de déchets non dangereux, 1992 pour les installations de stockage de déchets dangereux et 2004 pour les installations de stockage de déchets inertes.

Les installations de stockage de déchets conventionnels ayant reçu des déchets radioactifs de manière régulière ou occasionnelle, et référencés dans *L'Inventaire géographique*, sont au nombre de 13.

Elles se trouvent sur les communes suivantes :

- **Angervilliers** dans l'Essonne ;
- **Argences** dans le Calvados ;
- **Bailleau-Armenonville** dans l'Eure-et-Loir ;
- **Bellegarde** dans le Gard ;
- **Champteussé-sur-Baconne** dans le Maine-et-Loire ;
- **Frenay** en Savoie ;
- **Menneville** dans le Pas-de-Calais ;
- **Monteux** dans le Vaucluse ;
- **Pontailleur-sur-Saône** en Côte-d'Or ;
- **Saint-Paul-lès-Romans** dans la Drôme ;
- **Solérieux** dans la Drôme ;
- **Vif** dans l'Isère ;
- **Villeparisis** en Seine-et-Marne.

► INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DÉCHETS CONVENTIONNELS AYANT REÇU DES DÉCHETS RADIOACTIFS



LES STOCKAGES HISTORIQUES DE DÉCHETS SITUÉS AU SEIN OU À PROXIMITÉ D'INSTALLATIONS NUCLÉAIRES DE BASE ET DE BASE SECRÈTE

Les stockages de déchets situés au sein ou à proximité d'installations nucléaires ont pu recevoir régulièrement ou occasionnellement des déchets comportant, pour la plupart, une radioactivité ajoutée de l'ordre de quelques becquerels par gramme. Au total, une douzaine de stockages historiques est à ce jour recensée.

► L'AUTOROUTE A126 DE CHILLY-MAZARIN

Des terres (1 700 m³) et des matériaux très faiblement radioactifs (2 200 m³) ont été utilisés sur le chantier de cette autoroute dans les années 1970. Les terres provenaient de l'assainissement des terrains de l'ancienne usine de la Société nouvelle du radium (SNR) à Gif-sur-Yvette et les matériaux très faiblement radioactifs sont issus d'opérations d'assainissement de l'ancienne usine du Bouchet. La teneur moyenne en radium et en uranium de ces terres est comparable à celle rencontrée dans la nature (jusqu'à 3 becquerels par gramme).

► LA BUTTE DE MONTBOUCHER

Cette butte contient notamment des déchets qui seraient aujourd'hui catégorisés TFA (24 600 m³) produits lors de l'assainissement de l'ancienne usine du Bouchet entre mai 1975 et mars 1977.

► LE BÂTIMENT 133 DU CENTRE CEA DE SACLAY

Des remblais de déchets qui seraient aujourd'hui catégorisés TFA (17 m³ de débris en grès d'anciennes canalisations et 57 m³ de gravats et terres) ont été mis en place au niveau des fondations nord et sud du bâtiment 133 du centre de Saclay.

► LE BASSIN BÉTONNÉ DE L'ANCIEN PILOTE DE DÉGAINAGE DU CENTRE CEA DE MARCOULE

Il s'agit d'un ancien bassin qui a été équipé pour dégainer sous eau les combustibles pendant quelques mois avant que l'atelier dédié ne soit mis en actif en 1959. Ce bassin semi-enterré, contenant quelques machines et matériels, a ensuite été rempli de béton. Ce bassin d'un volume total de 1 116 m³ est entièrement isolé du procédé, toutes les tuyauteries ayant été déposées. Il a été étanché en partie supérieure. Un contrôle trimestriel de contamination surfacique est réalisé par le service de radioprotection dans le cadre des contrôles périodiques.

► LA DÉPOSANTE INTERNE DE MARCOULE

Le volume actuel est estimé à environ 126 000 m³ de déchets composés essentiellement de terres mélangées à des gravats. Afin de caractériser ce volume, 32 sondages répartis de façon homogène ont été réalisés dans la déposante jusqu'au terrain naturel rencontré entre 5 et 12 m de profondeur.

À souligner que les investigations menées n'indiquent pas de marquage radiologique, cependant, la cohérence entre les pratiques de gestion mise en œuvre amène par précaution à déclarer cette déposante comme celles de même nature à Cadarache (ZEDI) et à Valduc.

► LES TRANCHÉES DE MARCOULE

Quatre tranchées ont été successivement exploitées de 1963 à 1993 pour recevoir des déchets nucléaires de très faible activité et faible activité. Ces déchets sont principalement constitués de gravats, de ferrailles, de bétons, de cendres, de boues et de terres issues des terrassements du site, dont le conditionnement en fût n'était pas justifié à l'époque, et dont l'évacuation en décharge n'était pas acceptable. À la fin de l'exploitation de chacune des tranchées, des remblais ont été mis en place sur 1 m à 1,5 m au-dessus des déchets. Les quatre tranchées contiennent approximativement 50 000 m³ de déchets.

► LA ZONE D'ENTREPOSAGE DE DÉCHETS INERTES (ZEDI) DU CENTRE CEA DE CADARACHE

Cette zone de stockage de déchets a été créée à l'ouverture du centre. 192 000 m³ de déchets inertes y ont été stockés entre 1961 et 2007, dont 1 650 m³ de déchets contaminés (4 600 MBq) stockés entre 1963 et 1991. Le plan de surveillance chimique et radiologique de la zone prévoit une surveillance de la nappe par des piézomètres avec des prélèvements semestriels ou annuels en fonction des paramètres mesurés.

► LES PUIITS D'EXPÉRIMENTATION DU PEM – POLYGONE D'EXPÉRIMENTATION DE MORONVILLIERS

Il existe une centaine de puits contenant les résidus des expérimentations qui ont été menées au Polygone d'expérimentation de Moronvilliers. Ces puits ont été comblés et obturés. Dans le cadre du recensement des sites et des sols pollués, le CEA a déclaré le site du PEM dans la base de données Basol en mai 1997. L'ensemble du site, y compris la centaine de puits, fait l'objet d'une surveillance environnementale renforcée dont les résultats sont régulièrement transmis par le Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense (DSND) au préfet. Enfin, la cartographie radimétrique du site réalisé par hélicoptère a permis de confirmer la maîtrise du référentiel radiologique de ce site.

► LES SIX PREMIERS STOCKAGES DE DÉCHETS CONVENTIONNELS DU CENTRE CEA DE VALDUC

Jusqu'au début des années 1990, du fait de l'isolement du centre, les déchets ménagers et industriels banals ainsi que les gravats étaient mis en décharge, en six endroits sur le centre, conformément aux normes de l'époque et aux pratiques de l'ensemble des communes françaises. Ces stockages ont concerné principalement des matières banales, non dangereuses, déposées dans les points creux, tels que les amorces ou les départs de combe. Les déchets et les gravats ont ainsi été utilisés pour aplanir les zones en question. Un marquage radiologique ne peut pas être totalement exclu du fait des pratiques anciennes de décontamination. Les volumes concernés sont estimés entre 100 000 à 150 000 m³ et le niveau de contamination radioactive est estimé nul ou très faible par le CEA. Ces aires de stockage font l'objet d'une surveillance, notamment par des piézomètres situés en aval des zones de stockage.

► LE STOCKAGE DE L'AIRE 045 DU CENTRE CEA DE VALDUC

Cette aire a principalement accueilli les terres contaminées issues de l'opération de remédiation de la combe « au tilleul » réalisée en 1995. Elle est constituée d'un silo, dont le fond et les parois sont tapissés d'une membrane constituée par du PEHD soudé, en sandwich entre deux couches de tissu géotextile, le tout recouvert de sable. Le confinement est ainsi assuré. Ces terres ont une activité faible (en moyenne de 1 Bq/g et au maximum inférieure à 10 Bq/g). Le volume concerné est de 8 990 m³. Cette aire de stockage fait l'objet d'une surveillance. Des piézomètres situés en aval permettent notamment d'en assurer la surveillance.

► LA BUTTE DU CENTRE DE PIERRELATTE

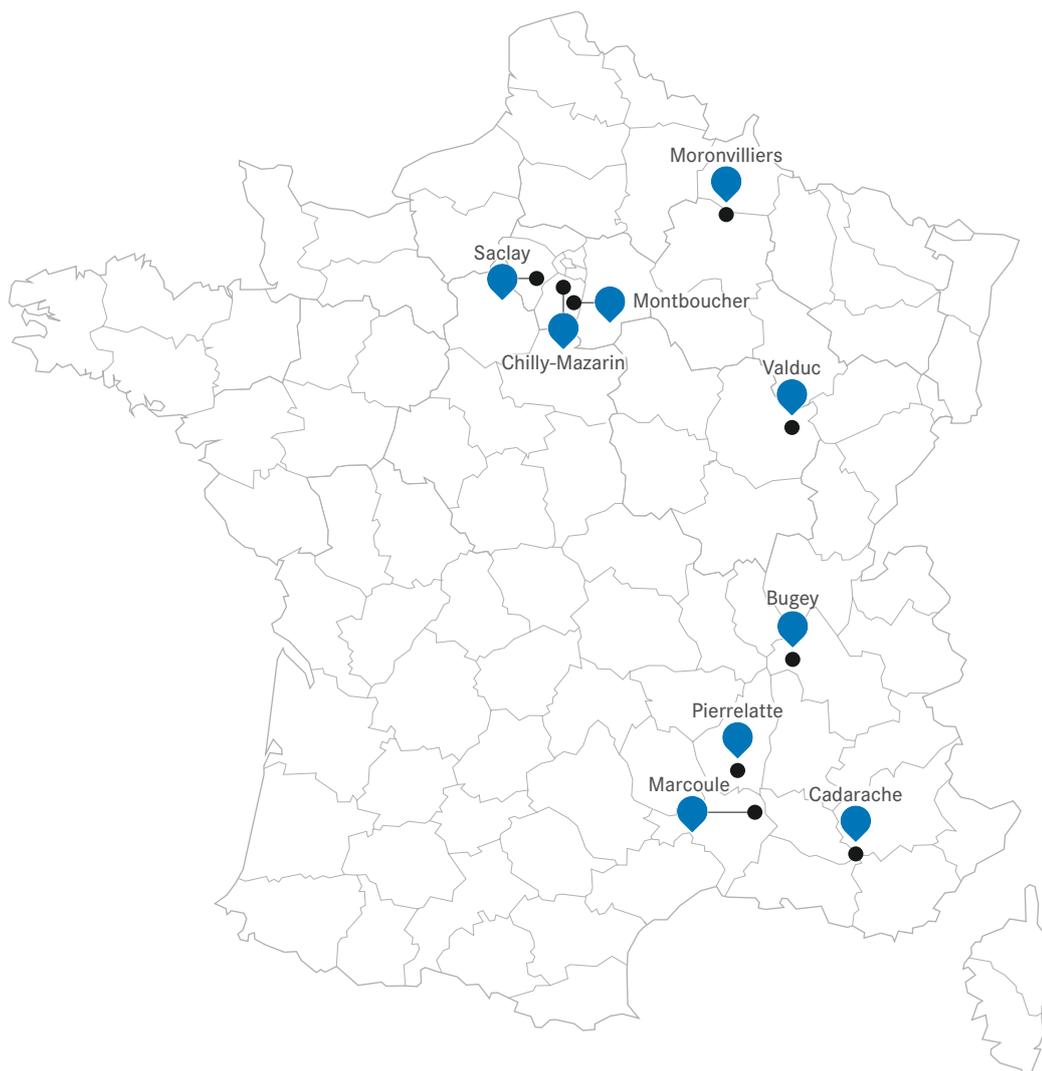
Cette butte, d'une superficie d'environ 37 000 m², a été formée au début des années 1960. Entre 1964 et 1977, des tranchées ont été réalisées afin d'y stocker environ 14 000 m³ de déchets

comprenant des fluorines issues du traitement de l'uranium et des boues chromatées. Un plan de surveillance de la qualité de la nappe est en place depuis 1998 et une surveillance de l'intégrité de l'ouvrage est mise en œuvre.

► LA BUTTE DE BUGEY

La présence d'environ 130 m³ de résines échangeuses d'ions (non radioactives selon les critères de l'époque), enfouies entre 1979 et 1984 au droit d'une butte artificielle d'environ 1 million de mètres cubes de remblais, a été mise en évidence en 2005 au cours des premières études d'implantation de l'installation Iceda au sud du site de Bugey. Cette butte est constituée de déblais naturels divers et de déchets non radioactifs issus de la construction des différentes unités de production. La surveillance de la qualité des eaux souterraines de cette zone est assurée par 11 piézomètres répartis autour de la butte.

► STOCKAGES HISTORIQUES DE DÉCHETS SITUÉS AU SEIN OU À PROXIMITÉ D'INSTALLATIONS NUCLÉAIRES DE BASE ET DE BASE SECRÈTE



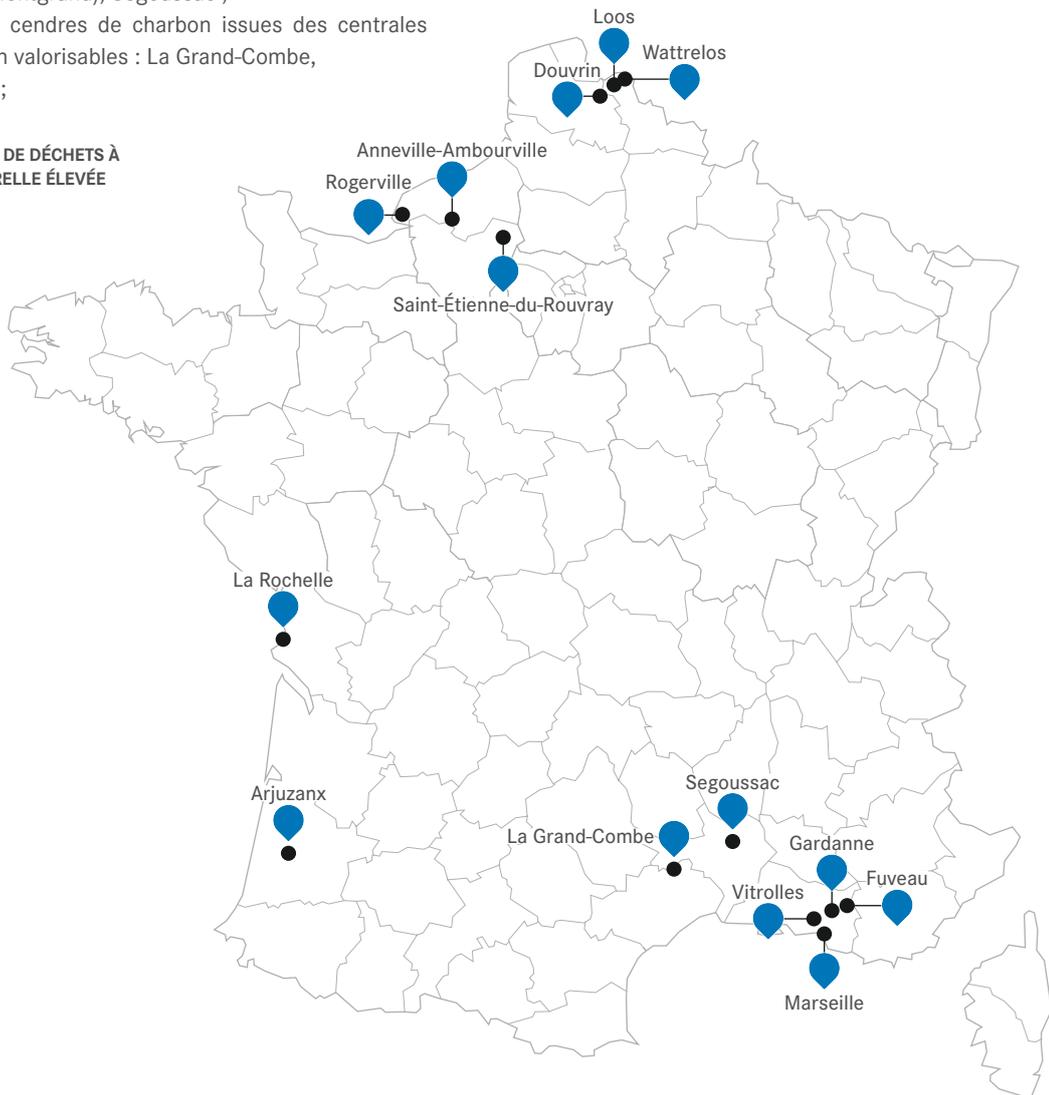
LES DÉPÔTS HISTORIQUES DE DÉCHETS À RADIOACTIVITÉ NATURELLE ÉLEVÉE

Plusieurs dizaines de dépôts de déchets contenant de la radioactivité naturelle élevée sont référencés dans *L'Inventaire géographique*. Il s'agit notamment de dépôts de déchets de phosphogypses provenant de la production d'engrais, de résidus de la production d'alumine et de cendres de charbon issues des centrales thermiques, pour certaines encore valorisables. Le Code de l'environnement s'applique à ces dépôts, notamment la mise en place d'une surveillance afin de contrôler qu'il n'y a pas de pollution de l'environnement significative. La plupart de ces dépôts de déchets NORM historiques peuvent être comparés à des déchets de très faible activité (TFA) possédant un niveau de radioactivité extrêmement faible, voire nul.

Les principaux sites de stockage de déchets à radioactivité naturelle élevée sont :

- les stockages de résidus issus de la production d'alumine : Gardanne, Vitrolles, Marseille (Aygaldes, La Barasse-Saint-Cyr, La Barasse-Montgrand), Segoussac ;
- les stockages de cendres de charbon issues des centrales thermiques et non valorisables : La Grand-Combe, Fuveau, Arjuzanx ;

► DÉPÔTS HISTORIQUES DE DÉCHETS À RADIOACTIVITÉ NATURELLE ÉLEVÉE



- les stockages de phosphogypses issus de la production d'acide phosphorique servant à la fabrication d'engrais. Ces sites ne sont plus exploités et sont surveillés : Anneville-Ambourville, Douvrin, Rogerville, Saint-Étienne-du-Rouvray, Wattrelos ;
- la lagune de Vernay à Loos. Ce site de traitement de minerai a généré des boues de filtration qui ont été stockées (3 600 m³) sur le site ;
- les zones portuaires de La Rochelle dont les installations ont été remblayées par des résidus provenant des activités historiques de production de terres rares à partir de minerai de monazite : le site de l'usine Chef-de-Baie à La Rochelle sur lequel 35 000 m³ de résidus solides issus du traitement de la monazite ont été utilisés comme remblai, le port de La Pallice à La Rochelle : l'usine Solvay a produit des résidus provenant du traitement de matériaux naturels très légèrement radioactifs, 50 000 m³ de ces résidus ont été utilisés comme remblai sur ce port.

À noter que certains des terrils de cendres de charbon sont repris pour valorisation dans les matériaux de construction (béton).

LES STOCKAGES DE LA DÉFENSE EN POLYNÉSIE FRANÇAISE

Entre 1966 et 1996, la France a procédé à des expérimentations nucléaires sur le Centre d'expérimentation du Pacifique (CEP), implanté sur les atolls de Mururoa et Fangataufa dans le Pacifique sud, sur le territoire de la Polynésie française.

Ces essais nucléaires ont d'abord été effectués dans l'atmosphère (1966-1974), puis en souterrain, dans des puits forés verticalement dans les roches de la couronne corallienne (1975-1987) ou sous les lagons (1981-1996).

Les déchets produits par ces expérimentations et le démantèlement des installations associées ont été stockés sur place dans des puits ou immergés dans les eaux territoriales françaises (*voir paragraphe : l'immersion des déchets*).

Les déchets stockés *in situ* dans le cadre de ces opérations sont présentés dans *L'Inventaire géographique* (outre-mer).

Lors de l'arrêt définitif des essais nucléaires français dans le Pacifique en 1996, la France a demandé à l'AIEA de réaliser une expertise radiologique des sites d'expérimentation de Mururoa, Fangataufa et des zones proches de ces sites. Cette expertise constitue la situation de référence des niveaux d'activité dans l'environnement de ces deux atolls.

Bien que les experts de l'AIEA aient conclu qu'il n'était pas nécessaire de continuer la surveillance radiologique des atolls de Mururoa et d'Hao, il a été décidé de maintenir un programme de surveillance afin de détecter en particulier d'éventuels relargages des radionucléides à partir des cavités et des sédiments des lagons.

Cette surveillance concerne l'environnement des deux atolls et se compose de deux volets :

- un suivi en continu des aérosols atmosphériques et de la dose intégrée ;
- une campagne annuelle de prélèvement d'échantillons. À ce jour, aucun relargage n'a été détecté.



L'atoll de Mururoa

L'IMMERSION DES DÉCHETS

L'évacuation en mer a été de tout temps un moyen de gestion de tous types de déchets. Les déchets radioactifs n'ont pas fait exception à cette règle. La solution de l'immersion simple de ces déchets était en effet considérée comme sûre par la communauté scientifique car la dilution et la durée présumée d'isolement apportées par le milieu marin étaient jugées suffisantes. C'est ainsi que cette pratique a été mise en œuvre par de nombreux pays pendant plus de quatre décennies, à partir de 1946.



Immersion de déchets radioactifs en mer dans les années 1960

D'abord organisées par les pays producteurs de déchets eux-mêmes, les immersions ont été coordonnées par les instances internationales à partir des années 1960. C'est dans ce cadre que la France a procédé à des immersions de déchets radioactifs dans l'Atlantique, en participant aux campagnes organisées par l'AEN en 1967 et 1969. Lors de ces deux opérations, la France a ainsi immergé 14 200 tonnes de déchets radioactifs conditionnés, d'activité totale d'environ 350 TBq, provenant tous du site de Marcoule.

Dès la mise en service du centre de stockage de la Manche en 1969, la France a renoncé à l'immersion pour la gestion de la plus grande partie des déchets radioactifs.

Ce mode de gestion a toutefois continué à être utilisé par la France, jusqu'en 1982, pour les déchets induits par les activités liées aux essais nucléaires en Polynésie française : 3 200 tonnes de déchets radioactifs, d'une activité totale inférieure à 0,1 TBq, ont ainsi été immergées dans les eaux territoriales françaises en Polynésie.

Il faut noter qu'aucune immersion française de déchets radioactifs n'a été pratiquée en Manche : seuls le Royaume-Uni et la Belgique ont utilisé la fosse des Casquets au nord-ouest du Cap de La Hague.

LA GESTION DES RÉSIDUS DE TRAITEMENT DES MINES D'URANIUM

L'exploitation des mines d'uranium en France entre 1948 et 2001 (en mine à ciel ouvert ou en mine souterraine) a conduit à la production de 76 000 tonnes d'uranium naturel. Les activités d'exploration, d'extraction et de traitement ont concerné environ 250 sites de dimensions très variables (de simples travaux de reconnaissance à des chantiers d'exploitation de grande ampleur) répartis sur 27 départements en France. Le traitement des minerais a été effectué principalement dans huit usines. Tous ces sites sont décrits dans l'inventaire national des sites miniers d'uranium *Mimausa* (Mémoire et impact des mines d'uranium : synthèse et archives) élaboré par l'IRSN.

On peut distinguer deux catégories de produits issus de l'exploitation des mines d'uranium :

- les stériles miniers qui désignent les produits constitués des sols et des roches excavés pour accéder aux gisements d'intérêt. La quantité des stériles miniers extraits peut être évaluée à environ 170 millions de tonnes. Pour l'essentiel, les stériles sont restés sur leur site de production. Ils ont été utilisés en comblement des mines à ciel ouvert ou des ouvrages miniers souterrains tels que les puits, pour les travaux de réaménagement en couverture des stockages de résidus ou placés en tas sous forme de versés. Environ 2 millions de tonnes de stériles miniers, soit 1 à 2 % de la quantité extraite, ont pu être utilisées comme matériaux de remblai, de terrassement ou en tant que soubassements routiers sur des lieux situés à proximité des sites miniers ;
- les Résidus de traitement des mines d'uranium (RTMU) désignent les produits restant après extraction de l'uranium contenu dans le minerai par traitement statique ou dynamique. Les résidus correspondent de fait à des déchets de procédé, leur quantité peut être évaluée à 50 millions de tonnes. Ces résidus correspondent à des déchets de procédé au sens du Code de l'environnement, c'est pourquoi les installations de stockage de ces résidus sont soumises à la nomenclature des ICPE et sont classées sous la rubrique 1735.

Les résidus de traitement sont stockés sur 17 sites, tous à proximité des installations de traitement de minerai d'uranium et correspondent à des déchets de type TFA ou FA-VL caractérisés par leur granulométrie et leur activité massique :

- les résidus de traitement de minerais à faible teneur (de l'ordre de 300 à 600 ppm d'uranium) avec une activité massique moyenne totale de 44 Bq/g (dont environ 4 Bq/g de radium 226). Ces résidus, issus de la lixiviation statique (environ 20 millions de tonnes), sont stockés soit en versés, soit en mines à ciel ouvert, soit utilisés comme première couche de couverture des stockages de résidus de traitement de lixiviation dynamique ;

- les résidus de traitement de minerais à forte teneur moyenne (de l'ordre de 1 000 à 10 000 ppm ou 0,1 à 1 % d'uranium) avec une activité massique moyenne totale de 312 Bq/g (dont environ 29 Bq/g de radium 226). Ces résidus, issus de la lixiviation dynamique (environ 30 millions de tonnes), sont stockés soit dans d'anciennes mines à ciel ouvert avec parfois une digue complémentaire, soit dans des bassins fermés par une digue de ceinture ou derrière une digue barrant un thalweg.

Les 17 sites de stockage concernés sont :

- Bauzot ;
- Bellezane ;
- Bessines-sur-Gartempe - Brugeaud ;
- Bessines-sur-Gartempe - Lavaugrasse ;
- Bertholène ;
- Gueugnon ;
- Jouac ;
- La Commanderie ;
- La Ribière ;
- Le Cellier ;
- L'Escarprière ;
- Les-Bois-Noirs-Limouzat ;
- Lodève ;
- Montmassacrot ;
- Rophin ;
- Saint-Pierre-du-Cantal ;
- Teufelsloch.

Sur une partie de ces sites, des déchets très faiblement actifs, liés à l'usage ou au démantèlement d'installations (de traitement des minerais ou de l'amont du cycle) ont également été stockés sur place. Il s'agit des sites de Bauzot, Saint-Pierre-du-Cantal, Bessines-sur-Gartempe, Gueugnon, Lodève, Jouac, L'Escarprière, Les-Bois-Noirs-Limouzat et Le Cellier.

Par ailleurs, trois sites de la Division minière de la Crouzille (Orano, anciennement Cogema puis Areva) ont été utilisés dans les années 1970 et 1980 comme décharges pour des déchets très faiblement actifs issus de divers établissements de l'amont du cycle : Fanay, Margnac et Peny.

Dans le cadre du PNGMDR, Orano a remis des études relatives à l'évaluation de l'impact à long terme sur la santé et l'environnement des stockages de résidus de traitement miniers (caractérisation physico-chimique des résidus, tenue géomécanique des digues et impact radiologique à long terme des stockages) ainsi que des anciens sites miniers d'extraction (gestion des rejets diffus et traitement des eaux, impact à long terme des stériles miniers). Les études remises dans le cadre du PNGMDR 2013-2015 ont permis :

- d'apporter des éléments concernant la modélisation de l'impact des stockages de résidus miniers ;
- d'améliorer la connaissance des phénomènes de transport de l'uranium des verses à stériles vers l'environnement ;
- d'améliorer la connaissance des mécanismes régissant la mobilité de l'uranium et du radium au sein des résidus miniers uranifères.

Par ailleurs, le Groupe d'expertise pluraliste (GEP) du Limousin a remis en 2010 un rapport sur l'impact actuel et à long terme de

ces exploitations minières. Ce rapport propose des options de gestion de surveillance¹.

Enfin, conformément à la circulaire du 22 juillet 2009², des bilans environnementaux de l'ensemble des sites miniers de responsabilité Orano, incluant les sites de stockage de résidus de traitement, sont en cours de réalisation. Un diagnostic des sites orphelins (dont le responsable n'est pas connu ou insolvable) est aussi en cours.



Ancienne mine d'uranium de Bellezane en exploitation...

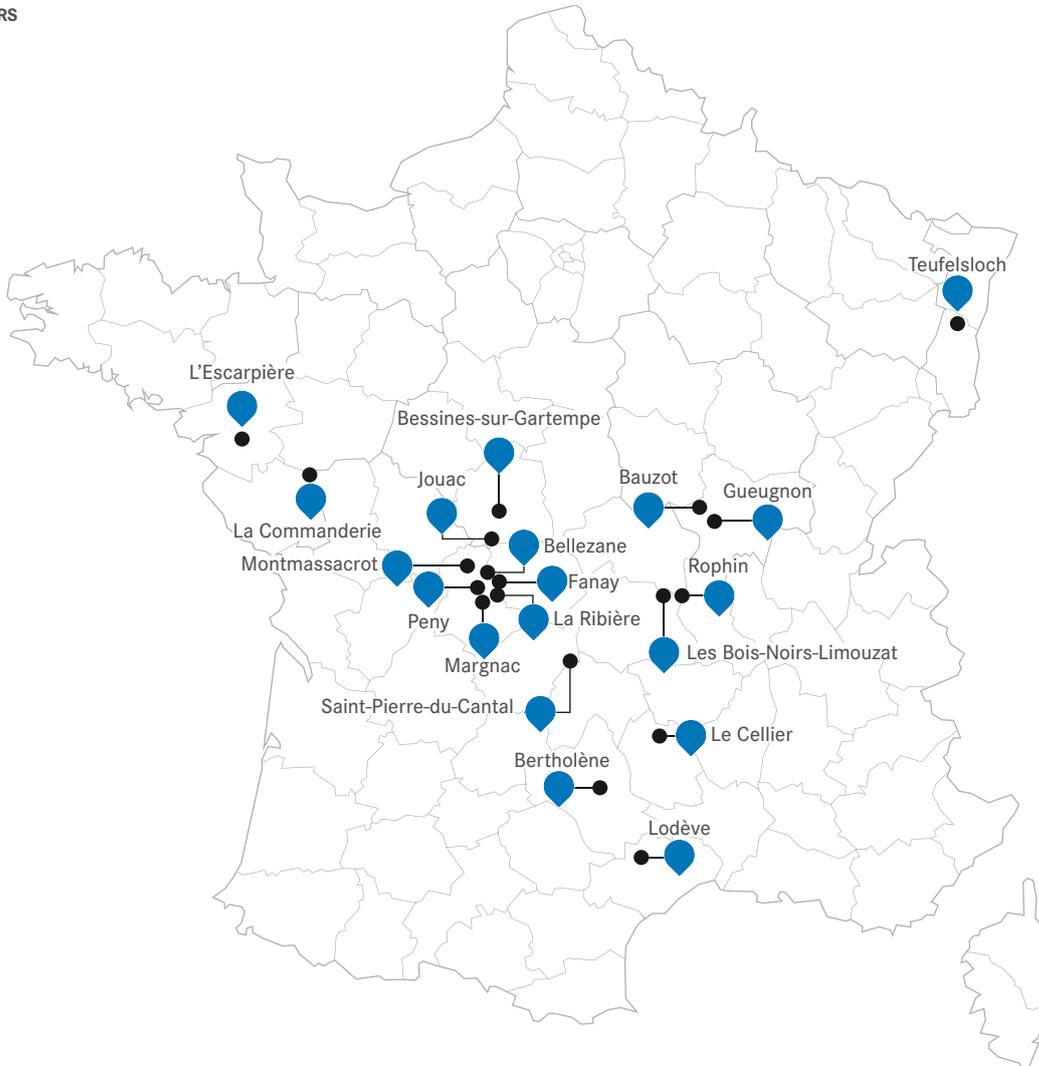


... et après réhabilitation

¹ *Recommandations pour la gestion des anciens sites miniers d'uranium en France. Des sites du Limousin aux autres sites, du court au moyen et long termes*, Rapport final du Groupe d'expertise pluraliste sur les mines d'uranium du Limousin (GEP), septembre 2010.

² Circulaire du 22 juillet 2009 relative à la gestion des anciennes mines d'uranium.

► LES SITES MINIERS



LA GESTION ACTUELLE DES DÉCHETS À RADIOACTIVITÉ NATURELLE ÉLEVÉE

Les déchets à radioactivité naturelle élevée sont des déchets générés par l'utilisation ou la transformation de matières premières naturellement riches en radionucléides naturels (NORM) mais qui ne sont pas utilisées pour leurs propriétés radioactives. Il s'agit de déchets de catégorie de faible activité à vie longue, voire de très faible activité.

Les déchets à radioactivité naturelle élevée font l'objet, depuis l'arrêté du 25 mai 2005¹, de modalités de gestion spécifiques. En fonction de leurs caractéristiques radiologiques, les déchets à radioactivité naturelle élevée peuvent être :

- gérés *in situ* ;
- valorisés en raison de leurs propriétés physico-chimiques, notamment pour être utilisés dans la fabrication de produits de construction ;
- stockés dans les Installations de stockage de déchets conventionnels (ISD). La réglementation prévoit la possibilité de stocker des déchets à radioactivité naturelle élevée dans des Installations de stockage de déchets dangereux (ISDD), des Installations de stockage de déchets non dangereux (ISDnD), des Installations de stockage de déchets inertes (ISDI). Quatre installations sont autorisées aujourd'hui à

¹ Arrêté du 25 mai 2005 relatif aux activités professionnelles mettant en œuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides non utilisés en raison de leurs propriétés radioactives.

prendre en charge des déchets à radioactivité naturelle élevée, conformément à la réglementation en vigueur. Ce sont les installations de stockage de déchets dangereux de Villeparisis, de Bellegarde, de Champeussé-sur-Baconne et d'Argences. Ces Installations de stockage de déchets dangereux (ISDD) ont fait les démarches pour accepter ce type de déchets selon les modalités de la circulaire du 25 juillet 2006¹. Cette circulaire précise entre autres les modalités de réception et de contrôle des déchets dans les installations de stockage de déchets, les conditions de surveillance de l'impact radiologique de l'admission de ces déchets sur l'environnement et les modalités d'information de l'inspection des installations classées au travers du bilan annuel d'exploitation. Les quantités de déchets à radioactivité naturelle élevée reçues sur ces installations sont largement inférieures aux capacités autorisées (moins de 10 % de la capacité autorisée) ;

- stockés dans les centres de stockage de l'Andra. Les déchets à radioactivité naturelle élevée de très faible activité qui ne peuvent être acceptés dans les installations de stockage de déchets conventionnels sont stockés au Cires. Environ 1 400 m³ de déchets de cette catégorie sont recensés (hors déchets générés par les établissements thermaux, les papeteries et la combustion de biomasse). De plus, les stocks de déchets à radioactivité naturelle élevée relevant de la catégorie FA-VL s'élèvent à environ 21 000 m³.

La gestion des déchets à radioactivité naturelle élevée va être profondément modifiée par le décret n° 2018-434 du 4 juin 2018² qui entre en vigueur le 1^{er} juillet 2018 et qui transpose des dispositions de la directive 2013/59/Euratom du conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants.

LE SITE D'ORFLAM PLAST À PARGNY-SUR-SAULX



L'ancien site d'Orflam avant...

Dans les années 1930, l'Usine de traitement de la monazite, qui deviendra ensuite l'usine Orflam-Plast, s'installe à Pargny-sur-Saulx pour fabriquer des pierres à briquets à partir de monazite. L'usine fonctionne jusqu'en 1967 puis ferme définitivement en 1997. L'extraction de la monazite, minéral riche en thorium, engendra la production de résidus faiblement radioactifs

concentrant la radioactivité initialement présente dans la monazite. Ces résidus sont à l'origine de la pollution sur le site qui a, par la suite, été assaini.

Une grande partie des déchets et des terres produits lors de l'assainissement a été évacuée vers le Cires. Une autre partie, majoritairement constituée de gravats très faiblement radioactifs, a fait l'objet d'un confinement sur site (3 000 m³).



... et après réhabilitation

¹ Circulaire du 25 juillet 2006 relative aux conditions d'acceptation des déchets à radioactivité naturelle renforcée ou concentrée dans les centres de stockage de déchets.

² Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire.





LES DOSSIERS THÉMATIQUES

Dossier 01 - Les solutions existantes et en projet en France pour la gestion à long terme des déchets radioactifs	86
Dossier 02 - Traitement et conditionnement des déchets radioactifs	94
Dossier 03 - Démantèlement et assainissement des installations nucléaires	102
Dossier 04 - Les sites pollués par la radioactivité	112
Dossier 05 - Les déchets radioactifs du secteur médical	120
Dossier 06 - Les sources scellées	134
Dossier 07 - Les inventaires des déchets radioactifs à l'étranger	144

DOSSIER

01

Les solutions existantes et en projet
en France pour la gestion à long terme
des déchets radioactifs

INTRODUCTION	87
STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE POUR LES DÉCHETS HA ET MA-VL	87
STOCKAGE À FAIBLE PROFONDEUR POUR LES DÉCHETS FA-VL	89
STOCKAGE EN SURFACE POUR LES DÉCHETS FMA-VC ET TFA	91
Les déchets FMA-VC	91
Les déchets TFA	91
LES CAS PARTICULIERS	92
Les déchets tritiés	92
Les déchets à vie très courte	92
Les déchets de Malvési	92
Les déchets sans filière	93

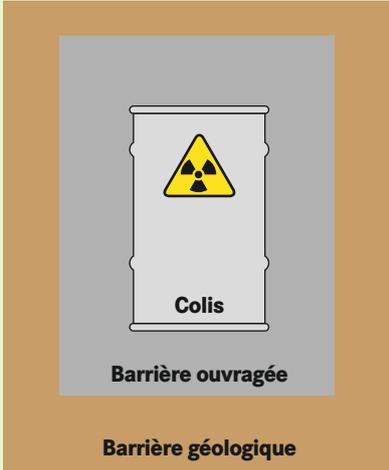
INTRODUCTION

Comme de nombreux pays, la France a fait le choix de mettre en place une gestion à long terme pour tous les déchets radioactifs. Cette gestion repose sur le stockage (en surface, à faible profondeur ou en couche géologique profonde), seule solution viable permettant le confinement des déchets pendant le temps nécessaire à la décroissance des éléments radioactifs qu'ils contiennent jusqu'à ce qu'ils ne présentent plus de risque pour l'homme et l'environnement.

Le confinement consiste à isoler les contaminants, de façon à prévenir d'une manière pérenne leur propagation, et à assurer le suivi et le maintien des mesures mises en place lors de la

conception de chaque centre de stockage. Cette conception est adaptée aux types de déchets accueillis selon trois composantes.

Aujourd'hui, il existe en France trois centres de stockage de surface (deux en phase d'exploitation et un en phase de fermeture¹) qui permettent de stocker la majorité des volumes de déchets radioactifs produits chaque année en France (déchets TFA et FMA-VC). Pour les autres types de déchets (FA-VL, MA-VL et HA), les centres de stockage adaptés sont en projet ou à l'étude. En attendant, les déchets correspondants sont entreposés dans des installations spécifiques, en général sur leurs sites de production.



Colis

Barrière ouvragée

Barrière géologique

LES COMPOSANTES D'UN STOCKAGE

Historiquement, la sûreté d'une installation nucléaire, quelle qu'elle soit, est basée sur la notion de redondance des moyens de protection. Cette notion se traduit par la mise en place entre les radioéléments et la biosphère de barrières successives. Leur rôle est de ralentir, si possible empêcher, la dispersion des radionucléides dans l'écosystème en :

- limitant les afflux d'eau ;
- retardant le relâchement des radioéléments dans la phase aqueuse ;
- retenant les éventuels radioéléments relâchés.

Dans le cas d'une installation de stockage de déchets nucléaires, le système de confinement est constitué de trois composantes :

- les colis qui contiennent les déchets ;
- les ouvrages de stockage dans lesquels sont placés les colis ;
- la géologie du site qui constitue une barrière naturelle.

STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE POUR LES DÉCHETS HA ET MA-VL

Après 15 ans de recherche sur la gestion des déchets HA et MA-VL et un débat public, la loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006, aujourd'hui codifiée dans le Code de l'environnement, a retenu le principe du stockage profond comme seule solution sûre à long terme pour gérer, sans en reporter la charge sur les générations futures, les déchets qui ne peuvent pas être stockés en surface ou à faible profondeur pour des raisons de sûreté ou de radioprotection. Dans l'objectif de la mise en œuvre de cette solution, cette loi a chargé l'Andra de mener des études et des recherches pour choisir un site et concevoir un centre de stockage réversible profond pour les déchets HA et MA-VL.

L'Andra porte ainsi un projet de Centre industriel de stockage géologique, Cigéo, conçu pour stocker la totalité des déchets HA et MA-VL produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles, y compris ceux résultant de leur démantèlement,

et par le retraitement des combustibles usés utilisés dans les centrales nucléaires.

Si sa création est autorisée, le centre Cigéo sera implanté dans l'est de la France, à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne.

Cigéo sera composé d'installations de surface, notamment pour accueillir les colis de déchets et pour réaliser les travaux de creusement et de construction des ouvrages souterrains. Les déchets seront stockés dans des installations souterraines situées à environ 500 mètres de profondeur, dans une couche de roche argileuse imperméable choisie pour ses propriétés de confinement sur de très longues échelles de temps.

Cigéo est prévu pour être exploité pendant au moins 100 ans, tout en étant flexible afin de laisser aux générations futures un maximum de possibilités pour permettre des adaptations.

¹ Anciennement dénommée phase de surveillance.

En avril 2016, l'Andra a remis pour instruction à l'ASN une série de documents, dont une proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo, un dossier d'options de sûreté et un dossier d'options techniques de récupérabilité.

L'ASN a rendu son avis sur ces dossiers en janvier 2018¹.

Il s'agissait d'une étape importante dans le processus progressif de conception de Cigéo, avant le dépôt de la demande d'autorisation de création. Les travaux de construction de Cigéo

pourraient démarrer après l'instruction de cette demande par l'ASN, une enquête publique et sous réserve de l'obtention d'un décret d'autorisation de création.

Après une phase industrielle pilote, le stockage des déchets sur le site est prévu pour durer plus d'un siècle.

Dans l'attente du stockage de ces déchets dans Cigéo, l'entreposage sur les sites des producteurs de ces déchets est un outil indispensable pour la gestion des déchets HA et MA-VL.

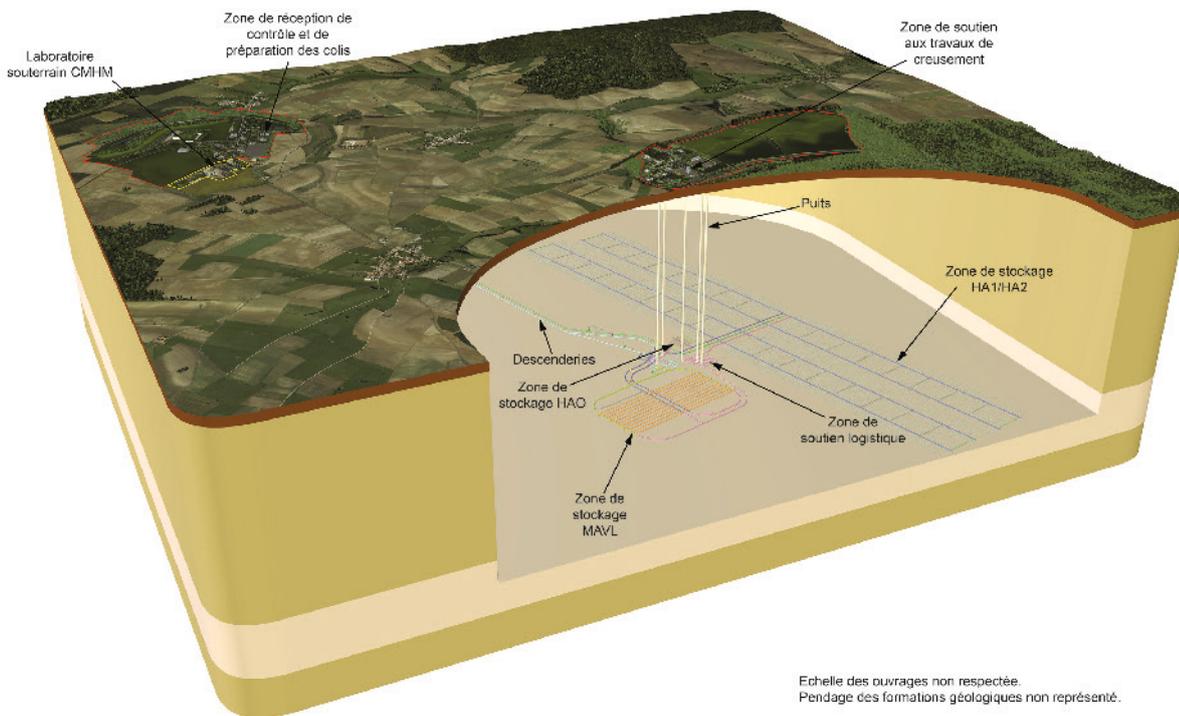


Schéma des installations de surface et souterraines du centre en projet Cigéo

¹ Avis n° 2018-AV-0300 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde.

AVANT LE STOCKAGE, L'ENTREPOSAGE

Avant d'être stockés, les déchets sont entreposés sur les sites dans des installations dédiées à cet effet. Il s'agit :

- pour les déchets à destination des centres de stockage existants :
 - d'entreposages tampon de déchets conditionnés sous forme de colis, à caractère logistique, permettant de gérer les flux vers les installations de l'Andra,
 - d'entreposages de déchets, notamment anciens, en attente de traitement, de conditionnement, avant évacuation ;
- pour les déchets à destination des centres de stockage en projet :
 - d'entreposages de déchets, notamment anciens, en attente de reprise, avant évacuation vers d'autres entreposages ou vers les centres de l'Andra en projet,

- d'entreposages en attente de la disponibilité des filières de stockage,
- d'entreposages pour les déchets de haute activité, qui doivent être entreposés plusieurs dizaines d'années en décroissance, avant de pouvoir être pris en charge en stockage profond.

Contrairement au stockage, l'entreposage est par définition temporaire.

L'entreposage peut aussi être utilisé à des fins de décroissance de la radioactivité des radioéléments à vie courte contenus dans les déchets, par exemple pour permettre l'évacuation vers le CSA.

STOCKAGE À FAIBLE PROFONDEUR POUR LES DÉCHETS FA-VL

La loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, aujourd'hui codifiée dans le Code de l'environnement, a chargé l'Andra de mettre au point des solutions de stockage pour les déchets de graphite issus principalement de l'exploitation et du démantèlement des réacteurs électronucléaires de première génération UNGG (Uranium naturel graphite gaz) et pour les déchets radifères. L'État a également demandé à l'Andra d'examiner la possibilité de prendre en compte d'autres déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) dans ces études.

Une démarche nationale de recherche de site pour l'implantation d'un centre de stockage FA-VL a été lancée en 2008 à la demande du gouvernement. L'Andra a contacté 3 115 communes, dont la géologie était *a priori* favorable à l'implantation d'un centre de stockage à faible profondeur, afin de leur présenter le projet. Fin 2008, l'Andra a remis au gouvernement un rapport d'analyse au plan géologique, environnemental et socio-économique de la quarantaine de communes qui avaient marqué leur intérêt pour le projet.

Après consultation de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), de la Commission nationale d'évaluation (CNE) et des élus des territoires concernés, le gouvernement a demandé à l'Andra en 2009 de mener des investigations géologiques approfondies sur deux communes. Toutefois, ces dernières ont retiré leur candidature.

Suite à ce retrait, le gouvernement a décidé de repousser les échéances pour donner du temps à la concertation et a demandé

à l'Andra d'explorer d'autres scénarios possibles pour la gestion de ces déchets, notamment d'étudier une gestion séparée des déchets radifères et de graphite.

En outre, le gouvernement a saisi le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) pour que soit effectué un retour d'expérience sur la recherche de site. Le HCTISN a remis ses recommandations au gouvernement en septembre 2011. Elles portent sur la sélection de site, le calendrier, les responsabilités, les interlocuteurs au niveau local, l'information du public, la concertation et l'accompagnement du projet. En particulier, le Haut Comité recommande de privilégier les territoires accueillant déjà des installations nucléaires. En parallèle, l'Andra a remis en 2012 un rapport sur les scénarios de gestion à long terme des déchets FA-VL. Ce rapport concluait à la nécessité de lancer des investigations géologiques et de poursuivre les travaux de caractérisation et de R&D sur les déchets pour avancer dans la conception d'un projet de stockage à faible profondeur.

Suite à ce rapport, le ministère chargé de l'écologie a demandé à l'Andra de poursuivre les travaux de recherche de site de stockage, tant auprès des sites accueillant déjà des installations nucléaires qu'auprès des territoires où des communes s'étaient portées candidates en 2008, comme l'a préconisé le HCTISN.

La communauté de communes de Soulaines dans l'Aube, qui fait partie des territoires concernés et accueille déjà les centres de stockage de surface exploités par l'Andra, a donné son accord en 2013 pour la réalisation d'investigations géologiques sur

son territoire. Conformément à la demande des élus locaux, une démarche de concertation a été mise en place avant toute présence sur le terrain. Les investigations géologiques qui ont été menées dans l'Aube entre mi-2013 et mi-2015 avaient pour objectif d'acquérir une meilleure connaissance de la géologie locale, afin de déterminer si la nature du sous-sol était adaptée à l'implantation éventuelle d'un centre de stockage pour des déchets de faible activité à vie longue.

Conformément à la demande du PNGMDR 2013-2015, l'Andra a remis un rapport d'étape sur la gestion des déchets FA-VL en 2015. Ce rapport a permis de tirer les enseignements des premières investigations géologiques réalisées ainsi que des avancées des études et des recherches menées sur les déchets par l'Andra et les producteurs (EDF, CEA, Orano, Solvay). Des études de conception préliminaires du stockage ont été menées et ont fait l'objet d'une première évaluation de sûreté. Le rapport d'étape 2015 identifie une zone géographique sur laquelle le projet sera poursuivi. Il identifie également les sujets à approfondir dans la suite du programme d'études. L'ASN, saisie sur ce rapport, a fait paraître ses recommandations dans l'avis n° 2016-AV-264¹.

En attendant la création par l'Andra d'un centre de stockage adapté, les déchets FA-VL sont entreposés, le plus souvent sur les sites où ils sont produits ou au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de l'Andra notamment pour ce qui concerne les déchets de l'industrie non électronucléaire.



Campagne d'investigations géologiques FA-VL complémentaires en 2017

L'INSTALLATION D'ENTREPOSAGE DU CIRES

L'Andra a mis en service en 2012, au Cires, un bâtiment d'entreposage de déchets radioactifs à vie longue destiné notamment aux déchets de l'industrie non-électronucléaire, d'une surface de 2 000 m².

Les déchets, qui relèvent des catégories FA-VL (pour la plus grande partie) et MA-VL, y sont regroupés dans différents halls selon leurs caractéristiques radiologiques. Ils seront repris au fur et à mesure pour être stockés lors de la mise en service des centres de stockage.

Les principaux déchets entreposés au Cires à fin 2016 sont :

- des paratonnerres radioactifs ;
- des objets radioactifs provenant de particuliers (fontaines au radium, objets radioluminescents, etc.) ;
- des objets radioactifs à usage médical utilisés dans l'entre-deux-guerres comme des objets de collection (aiguilles, tubes, compresses au radium) ;
- des déchets (terres, gravats, etc.) résultant de l'assainissement de sites pollués par la radioactivité contenant des éléments radioactifs à vie longue (radium, thorium).

¹ Avis n° 2016-AV-264 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 mars 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.

STOCKAGE EN SURFACE POUR LES DÉCHETS FMA-VC ET TFA

LES DÉCHETS FMA-VC

Le stockage en surface des déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) est pratiqué en France depuis 1969. Il existe en France deux centres dédiés aux déchets de cette catégorie : le Centre de stockage de la Manche (CSM) et le Centre de stockage de l'Aube (CSA).

Environ 527 000 m³ de déchets ont été stockés au Centre de stockage de la Manche entre 1969 et 1994. Ce centre est en phase de fermeture depuis 1994 et n'accueille donc plus de déchets.

Le Centre de stockage de l'Aube, en activité depuis 1992, est implanté sur les communes de Soulaines-Dhuys, Épothémont et La Ville-aux-Bois. Il couvre une superficie de 95 ha, dont 30 réservés au stockage, et a une capacité autorisée d'un million de mètres cubes de colis de déchets radioactifs.

Les déchets stockés au CSA sont conditionnés dans des colis en béton ou métalliques. Ces colis sont stockés dans des ouvrages en béton armé de 25 m de côté et de 8 m de hauteur, construits sur une zone géologique constituée d'une couche argileuse surmontée d'une couche sableuse. La couche d'argile est imperméable et constitue une barrière naturelle en cas de dispersion accidentelle d'éléments radioactifs dans le sous-sol. Au-dessus de l'argile, la couche sableuse draine les eaux de pluie vers un exutoire unique, ce qui facilite la surveillance de l'environnement.

Les espaces entre les colis dans un ouvrage sont comblés par du béton ou des gravillons selon qu'il contient des colis métalliques ou en béton. L'ouvrage est ensuite fermé par une dalle de béton et recouvert d'une couche de polyuréthane imperméable. À la fin de l'exploitation du centre, une couverture composée notamment d'argile sera placée sur les ouvrages pour assurer le confinement des déchets à long terme puis le site sera surveillé pendant au moins 300 ans.

L'étanchéité des ouvrages est vérifiée grâce à un réseau de galeries souterraines, régulièrement contrôlées.



Stockage d'un colis de déchets FMA-VC

LES DÉCHETS TFA

À la demande des pouvoirs publics, l'Andra a développé une solution spécifique pour les déchets de très faible activité.

En effet, dans de nombreux pays, en dessous d'un certain niveau de radioactivité dit « seuil de libération », les déchets sont gérés comme des déchets conventionnels. En France, tous les déchets produits par des installations nucléaires de base, des ICPE ou des installations autorisées au titre du Code de la santé publique, contenant ou susceptibles de contenir des éléments radioactifs sont gérés dans des filières dédiées.

Depuis 2003, ces déchets sont stockés au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires), situé sur les communes de Morvilliers et de La Chaise. Ce centre, qui est une Installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE), couvre une superficie de 46 ha dont 18 dédiés au stockage.

Il est destiné à accueillir 650 000 m³ de déchets provenant pour l'essentiel du démantèlement des installations nucléaires françaises. Il s'inspire, dans son principe, des installations de stockage pour les déchets dangereux de l'industrie chimique.

Les colis de déchets, contrôlés à leur arrivée sur le site, sont stockés dans des alvéoles creusées dans l'argile, dont le fond est aménagé pour recueillir d'éventuelles eaux infiltrées. Ils sont isolés de l'environnement par un dispositif comprenant :

- une membrane synthétique entourant les alvéoles de déchets, associée à un système de contrôle de l'étanchéité ;
- la couche d'argile sous et sur les flancs des alvéoles de stockage.

Pendant leur exploitation, les alvéoles sont protégées par des toits démontables formant un tunnel et équipés de dispositifs de surveillance. Une fois remplis, les alvéoles sont couverts d'une couche d'argile associée à un système de collecte de lixiviats et de contrôle.



Alvéole de stockage de déchets TFA

LES CAS PARTICULIERS

Outre les déchets faisant l'objet de modes de gestion spécifiques (voir chapitre 4), certains cas font l'objet de modalités de gestion particulières du fait de leurs caractéristiques physico-chimiques.

LES DÉCHETS TRITIÉS

Le tritium est un radionucléide à vie courte (période radioactive d'environ 13 ans), qui est difficilement confinable et peut facilement migrer vers l'environnement. Les déchets contenant du tritium (déchets « tritiés ») sont donc gérés spécifiquement : ils sont entreposés pendant une durée suffisamment longue, de l'ordre d'une cinquantaine d'années, pour permettre la décroissance de l'activité tritium des colis avant d'être orientés, en fonction de leur niveau de radioactivité et du taux de dégazage résiduel, vers l'un des centres de stockage de l'Andra. Les déchets tritiés dont l'activité ou le taux de dégazage en tritium est trop important peuvent faire l'objet d'un traitement thermique afin de réduire leur activité ou leur dégazage avant entreposage.

À fin 2016, le volume de déchets tritiés entreposés était d'environ 5 640 m³. Ces déchets sont la plupart du temps sous forme solide. Il existe toutefois de faibles quantités de déchets tritiés liquides et gazeux.

La grande majorité des déchets tritiés (de l'ordre de 99 %, soit environ 5 580 m³ à fin 2016) provient du secteur de la défense nationale, en quasi-totalité des activités liées à la force de dissuasion. Par ailleurs, des industriels et des laboratoires de recherche médicale et pharmaceutique ont utilisé et utilisent encore du tritium, générant ainsi des déchets tritiés : à fin 2016, le volume correspondant était de 60 m³. Enfin, l'installation ITER générera également des déchets tritiés (après 2030) et deviendra le premier producteur de déchets tritiés, d'abord dans sa phase de fonctionnement puis, à l'horizon 2060, dans sa phase de démantèlement. Actuellement, les déchets tritiés sont entreposés sur les sites de production. Le CEA a notamment mis en service en 2012 un centre d'entreposage à Valduc pour accueillir ses propres déchets tritiés de très faible activité. De la même façon, ITER a prévu la construction d'un entreposage pour les déchets produits par son fonctionnement et son démantèlement. Les premiers modules d'entreposage seront disponibles en 2027.

À terme, il est envisagé de bénéficier de l'entreposage d'ITER pour entreposer les déchets tritiés issus des secteurs de la recherche (hors CEA), de l'industrie non électronucléaire et du médical.

Dans l'attente de la mise en service de cette installation, en cas d'urgence pour l'environnement ou la santé, ils pourraient être entreposés sur le site de Valduc de façon transitoire, après accord au cas par cas de l'autorité de sûreté compétente (ASND).



Installation ITER en construction

LES DÉCHETS À VIE TRÈS COURTE

La majeure partie des déchets à vie très courte sont des déchets hospitaliers qui contiennent des radionucléides de période radioactive inférieure à 100 jours, utilisés à des fins diagnostiques ou thérapeutiques (voir dossier thématique 5).

Ces déchets sont gérés en décroissance sur leur site de production : ils sont entreposés pendant une durée supérieure à 10 fois la période la plus longue des radionucléides qu'ils contiennent.

Leur radioactivité a alors décru d'un facteur 1 000 et ils peuvent être évacués après contrôle vers des filières conventionnelles.



Cuves de décroissance

LES DÉCHETS DE MALVÉSI

Le site industriel Orano de Malvési assure depuis 1960 la première étape de conversion de l'uranium nécessaire au cycle du combustible nucléaire. Le procédé mis en œuvre pour effectuer la conversion de l'uranium engendre des déchets solides entreposés dans des bassins de décantation sur le site de Malvési.

La spécificité de ces déchets, dits historiques (volumes importants), explique qu'ils ne s'intègrent pas dans les filières de stockage existantes ou en projet. Ces déchets correspondent à la famille RTCU (Résidus du traitement de conversion de l'uranium) de l'Inventaire national. Des études sont en cours afin de définir une solution de gestion définitive pour ces déchets.

Pour les déchets à produire à compter du 1^{er} janvier 2019, Orano travaille actuellement sur deux projets destinés, d'une part à réduire le volume des déchets solides produits et à privilégier les filières de gestion existantes, et d'autre part à traiter (par un procédé thermique) les futurs effluents liquides de procédé, conjointement à ceux déjà entreposés dans les bassins d'évaporation. Ces évolutions à venir du procédé conduiraient à différencier deux familles de déchets à produire :

- des déchets solides, composés de fluorures et gypses qui seront produits à l'avenir par l'usine sous forme de boues densifiées et entreposés en alvéoles sur le site ;
- des déchets solides issus du traitement thermique des effluents liquides nitrates qui seront produits par le fonctionnement à venir des installations de conversion, mais aussi par la reprise du stock déjà entreposé dans les bassins d'évaporation.

Les déchets qui seront produits après le 1^{er} janvier 2019 ne seront plus considérés comme assimilables aux RTCU historiques et devront, après traitement et conditionnement, être intégrés aux filières de gestion TFA et FA-VL.



Vue aérienne du site Orano de Malvesi

LES DÉCHETS SANS FILIÈRE

La majorité des déchets radioactifs possède une filière de gestion existante ou en projet. Toutefois, une faible quantité de déchets, estimée à 1 800 m³ à fin 2016, contre 3 800 m³ à fin 2013, ne peut y être rattachée. Ces déchets sont dits « sans filière » de gestion (ou d'élimination). Ils sont définis comme étant des déchets qui n'entrent dans aucune des filières d'élimination existantes ou

en projet, dans l'état des connaissances du moment, en raison notamment de leurs caractéristiques physiques ou chimiques particulières. Ils font l'objet d'études visant à définir des solutions de gestion adaptées à chacun d'entre eux.

Dans ce contexte, un groupe de travail a été mis en place dans le cadre du PNGMDR 2010-2012. Ce groupe de travail a permis, outre la consolidation de l'inventaire des déchets sans filière, d'identifier trois catégories de déchets qualifiés de « prioritaires » pour la recherche d'une solution mutualisée.

Il s'agit :

- de déchets contenant de l'amiante libre qui n'étaient pas acceptés en stockage, compte tenu de leur forte capacité de remise en suspension et des exigences vis-à-vis des conditions d'exploitation et des scénarios de sûreté à long terme ;
- de déchets contenant du mercure susceptible de se volatiliser ou de se lixivier, en fonction des conditions physico-chimiques ;
- de certaines huiles et liquides organiques qui ne sont pas compatibles avec les spécifications d'acceptation de l'installation d'incinération Centraco de Cyclife à Codolet.

Les études menées lors de la période 2013-2015 ont permis :

- de trouver des solutions de gestion pour les déchets contenant de l'amiante libre. En effet, depuis la révision par l'Andra des spécifications pour l'acceptation en stockage de déchets amiantés sur ces centres, ces déchets sont dorénavant déclarés en grande partie dans la catégorie TFA ;
- le développement d'un procédé de stabilisation du mercure contenu dans les déchets radioactifs pour produire un déchet solide stabilisé qui satisfait aux spécifications pour stockage au Cires ou au CSA. Cependant, pour certains déchets mercuriels, le procédé d'insolubilisation peut nécessiter un prétraitement. Des développements sont en cours pour permettre leur mise en œuvre dans un contexte nucléaire ;
- l'identification de divers traitements des huiles et liquides organiques, en fonction de leurs caractéristiques, de maturité technologique variable. Un procédé de traitement par mélange avec des polymères est notamment envisagé. Ce procédé produit un déchet stabilisé dont l'acceptation à Centraco de Cyclife et dans les centres de stockage de l'Andra n'est à ce jour pas acquise en raison d'une caractérisation insuffisante. La stratégie privilégiée est un assemblage avec d'autres huiles et liquides organiques collectés par l'Andra auprès de producteurs non électronucléaires afin d'en réduire l'activité radiologique et la concentration en éléments toxiques, et ainsi respecter les critères de prise en charge.

D'autres déchets sans filière produits dans les installations nucléaires et n'entrant pas dans les catégories ci-avant font l'objet d'études visant à développer des procédés de traitement en vue de leur acceptation en stockage. Celles-ci sont notamment présentées dans le cadre des stratégies de gestion des déchets des exploitants et périodiquement examinés par l'ASN et l'ASND.

DOSSIER

02

Traitement et conditionnement des déchets radioactifs

GÉNÉRALITÉS SUR LE TRAITEMENT ET LE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS RADIOACTIFS	95
--	-----------

LES PRINCIPAUX PROCÉDÉS INDUSTRIELS DE TRAITEMENT ET DE CONDITIONNEMENT	96
--	-----------

Procédés de traitement	96
Compactage	96
Évaporation	97
Incinération	97
Fusion	98

Procédés de conditionnement	98
Cimentation	98
Bitumage	99
Vitrification	100
Enrobage par des résines polymères	100

LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR LE TRAITEMENT ET CONDITIONNEMENT	101
---	------------

Pivic : vers un nouveau procédé pour traiter les déchets contaminés par des émetteurs alpha	101
--	------------

Développement d'un liant hydraulique spécifique pour les déchets magnésiens	101
--	------------

GÉNÉRALITÉS SUR LE TRAITEMENT ET LE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Lorsqu'ils sont produits, les déchets radioactifs se trouvent sous une forme brute, qui peut être gazeuse, liquide ou solide. Pour gérer ces déchets, il est le plus souvent nécessaire de les conditionner, c'est-à-dire de fabriquer des « colis de déchets » permettant de les manutentionner et garantissant le confinement des radionucléides. En fonction de la nature physico-chimique des déchets, l'opération de conditionnement peut être précédée d'un traitement qui permet de disposer d'un déchet présentant des caractéristiques adaptées à sa gestion à long terme.

Le conditionnement peut ainsi être défini comme étant l'ensemble des opérations consistant à introduire les déchets, éventuellement traités au préalable, dans un conteneur, où ils peuvent être incorporés ou non dans un matériau d'enrobage ou de blocage, pour former un colis de déchets.

Le choix du traitement, d'une éventuelle matrice (d'enrobage ou de blocage) et du conteneur est principalement lié aux caractéristiques radiologiques et physico-chimiques des déchets bruts. Il vise aussi à optimiser le volume conditionné des déchets, notamment en augmentant leur taux d'incorporation dans la matrice dédiée et/ou en réduisant les dimensions des conteneurs.

Les principales matrices utilisées pour conditionner des déchets liquides ou pulvérulents sont :

- la matrice cimentaire pour les boues, concentrats d'évaporation, cendres d'incinération ;
- le bitume notamment pour l'enrobage de boues et de concentrats d'évaporation résultant du traitement des effluents liquides ;
- la matrice vitreuse notamment pour les solutions de produits de fission ;
- la matrice polymère à base de résines époxy pour les résines échangeuses d'ions (REI).

Pour les déchets solides, deux procédés sont couramment utilisés :

- l'enrobage ou le blocage, notamment par un liant hydraulique, des déchets compactés ou non après leur mise en conteneur ;
- l'empilement direct de galettes compactées dans un conteneur, sans ajout de liant hydraulique.

Les conteneurs sont de différentes formes (cylindriques ou parallélépipédiques), adaptées à leur contenu et lieux d'entreposage et de stockage. Différents matériaux sont utilisés pour ces conteneurs. Les plus utilisés aujourd'hui sont le béton, fibré ou non, et l'acier inoxydable.

Pour être pris en charge dans une installation d'entreposage ou de stockage, le colis de déchets doit respecter les spécifications d'acceptation définies pour cette installation. Ces spécifications sont établies à partir des caractéristiques des colis de déchets attendus et de celles de l'installation concernée et précisent les performances attendues du colis en fonction des déchets qu'il contient. Par exemple, elles peuvent interdire la présence de déchets putrescibles ou liquides, ou limiter la quantité de rejet gazeux d'un colis de déchets.



■ **Un déchet conditionné** est un déchet qui :

- soit est accepté sans traitement complémentaire dans un centre de stockage en exploitation ;
- soit est conforme aux spécifications d'acceptation en stockage du centre en exploitation auquel il est destiné ;
 - soit pour lequel aucun traitement complémentaire n'est envisagé par son producteur avant stockage dans le cas où il n'existe pas de centre de stockage en exploitation pour ce déchet.

■ **Un déchet préconditionné** est un déchet qui n'est pas en vrac et pour lequel un traitement complémentaire (décontamination, blocage, compactage, vitrification, fusion, injection, incinération, etc.) est envisagé par son producteur avant stockage.

■ **Un déchet non conditionné** est un déchet qui est en vrac, notamment s'il se trouve dans des cuves, des fosses ou des silos.

Ces définitions sont issues de l'arrêté du 9 octobre 2008 modifié par les arrêtés du 4 avril 2014 et du 16 mars 2017.

LES PRINCIPAUX PROCÉDÉS INDUSTRIELS DE TRAITEMENT ET DE CONDITIONNEMENT

Depuis les années 1950 et la mise en service des premiers réacteurs nucléaires en France, de nombreux procédés de traitement et de conditionnement ont été étudiés et développés

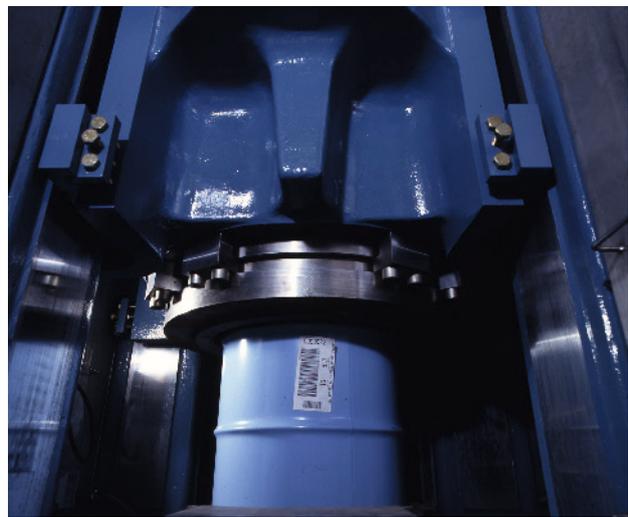
pour gérer les déchets produits par l'ensemble des installations nucléaires. Les principaux procédés de traitement et de conditionnement mis en œuvre sont présentés ci-après.

PROCÉDÉS DE TRAITEMENT

COMPACTAGE

Le compactage est destiné à réduire le volume de certains déchets solides, notamment métalliques ou plastiques. Ce procédé utilise des presses de différentes technologies et de capacités allant de quelques centaines de tonnes à quelques milliers de tonnes, en fonction de la nature des déchets à compacter. Après compactage, les déchets sont mis en conteneur et éventuellement bloqués par un liant hydraulique.

Le compactage est généralement mis en œuvre par les producteurs de déchets (sur les sites de La Hague, de Cadarache, etc.), mais également par l'Andra sur les centres de stockage en exploitation [Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de déchets de très faible activité et Centre de stockage de l'Aube (CSA) dédié aux déchets de faible et moyenne activité à vie courte].



Presse à compacter du Centre de stockage de l'Aube (CSA)



LES COLIS DE DÉCHETS COMPACTÉS

Les éléments des structures des assemblages de combustibles usés des réacteurs de la filière à eau légère : tubes de gainage, pièces d'extrémité d'assemblage, grilles, ressorts, etc., sont compactés et conditionnés dans l'Atelier de compactage des coques (ACC) de La Hague, mis en service en 2002. Les colis contiennent également des déchets solides métalliques d'exploitation compactés.

Ces colis de déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), qui relèvent de la famille F2-3-02, se présentent sous la forme d'un conteneur en acier inoxydable d'environ 1,4 m de hauteur et 43 cm de diamètre contenant de l'ordre de 600 kg de déchets compactés.

ÉVAPORATION

Avant conditionnement, les déchets liquides sont parfois, lorsque leurs caractéristiques chimiques le permettent, concentrés par chauffage et évaporation, ce qui permet d'en réduire le volume. Les concentrats ainsi obtenus sont ensuite conditionnés directement, par cimentation ou bitumage par exemple.

L'évaporation est généralement intégrée, sur le site des producteurs, à l'installation mettant en œuvre le conditionnement retenu pour les concentrats.

INCINÉRATION

L'incinération permet de réduire de façon significative la masse et le volume des déchets et de concentrer leur radioactivité dans les cendres. Elle est particulièrement adaptée aux déchets liquides aqueux et organiques, aux solvants ou aux liquides de scintillation ainsi qu'aux déchets solides organiques, de très faible activité (TFA) ou de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). L'installation Centraco de Cyclife à Codolet, en service depuis 1999, permet ainsi par exemple d'incinérer des déchets liquides et solides.

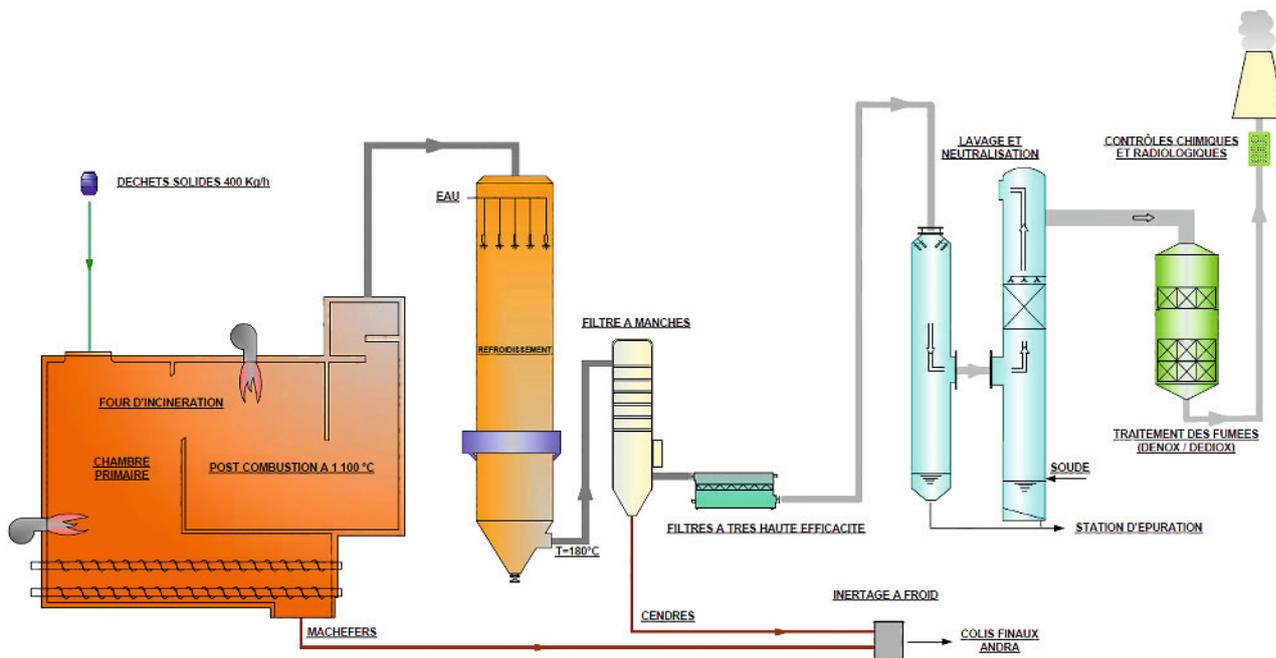


Schéma de principe du procédé d'incinération © Centraco de Cyclife



LES COLIS DE DÉCHETS DE RÉSIDUS D'INCINÉRATION CIMENTÉS

Les résidus d'incinération se présentent sous la forme de mâchefers, de scories et de cendres. Ces résidus d'incinération bruts sont broyés et mélangés avec un matériau à base de ciment, pour être coulés dans un fût en acier non allié dont le couvercle est ensuite soudé. Ils constituent ainsi des colis de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC), rattachés à la famille F3-7-01.

La masse du colis fini est d'environ 1,5 t pour un volume de 450 l. Un tel colis contient environ 370 kg de résidus bruts d'incinération.

FUSION

Comme l'incinération, la fusion permet de réduire le volume de déchets et de décontaminer partiellement ces déchets qui peuvent ensuite éventuellement être recyclés au sein de la filière électronucléaire. La fusion est utilisée pour le traitement de déchets métalliques.

La fusion est pratiquée, par exemple, sur l'installation Centraco de Cyclife pour traiter des déchets en acier ou en métal non ferreux provenant des opérations de maintenance ou de démantèlement des installations nucléaires.

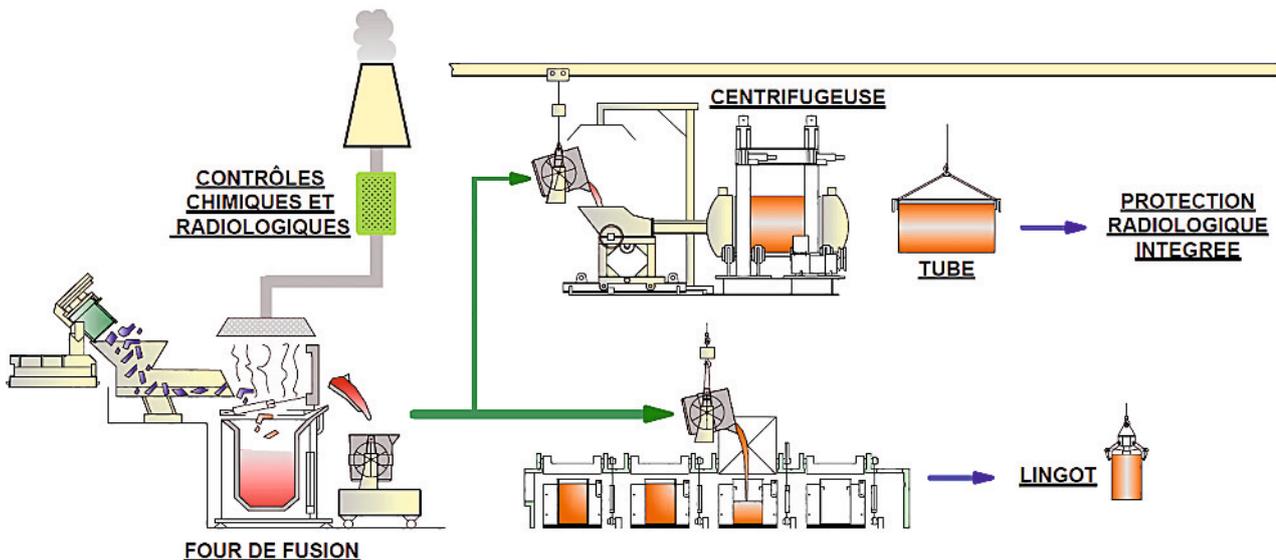


Schéma de principe du procédé de fusion © Centraco de Cyclife

PROCÉDÉS DE CONDITIONNEMENT

CIMENTATION

Le procédé de cimentation est utilisé pour :

- bloquer des déchets solides tels que des déchets technologiques, des déchets activés et des déchets de structure. Il produit dans ce cas des colis de déchets dits hétérogènes ;
- enrober des déchets en solution ou sous forme pulvérulente : concentrats d'évaporation, boues de traitements chimiques, résines échangeuses d'ions, etc. Les colis de déchets ainsi fabriqués sont dits homogènes.

Il s'agit du procédé de conditionnement le plus largement utilisé. En effet, les matrices cimentaires réunissent de nombreux facteurs favorables : disponibilité, coût modeste, simplicité de mise en œuvre, bonne résistance mécanique et, en général, stabilité dans le temps.

La cimentation est ainsi largement mise en œuvre sur les sites des producteurs de déchets (sur les sites de La Hague, de Cadarache, de Marcoule, etc.). Ce procédé est également pratiqué sur les sites de l'Andra au Cires et au CSA.

LES COLIS DE DÉCHETS CIMENTÉS



Les déchets générés lors du fonctionnement courant des différents ateliers et laboratoires, d'opérations de maintenance ou de démantèlement des installations du site de La Hague sont conditionnés dans des conteneurs cylindriques en béton-fibres. Sur la base de l'activité des déchets, ces colis sont soit stockés au CSA (pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte, FMA-VC, qui relèvent de la famille F3-3-11) soit entreposés dans l'attente de la disponibilité d'un centre de stockage adapté (pour les déchets de moyenne activité à vie longue MA-VL, et de faible activité à vie longue FA-VL, qui relèvent respectivement des familles F2-3-08 et F9-3-03).

La masse du colis fini est d'environ 2,5 t pour un volume de 1,18 m³. Un tel colis contient environ 450 kg de déchets.

BITUMAGE

Le procédé d'enrobage par bitumage consiste à mélanger, à chaud, des déchets se présentant sous forme de boues à du bitume. Le mélange obtenu est déshydraté et coulé dans un conteneur où il est refroidi. Le bitume présente des propriétés intéressantes au regard de son pouvoir agglomérant élevé, sa grande inertie chimique, son imperméabilité, sa faible solubilité dans l'eau, son pouvoir de confinement important, son coût modéré et, enfin, sa disponibilité.

Ce procédé est mis en œuvre sur les sites des producteurs de déchets essentiellement pour conditionner les boues de précipitation résultant du traitement des effluents liquides. Il est aujourd'hui remplacé en grande partie par la cimentation ou la vitrification en fonction de la nature des déchets à traiter.

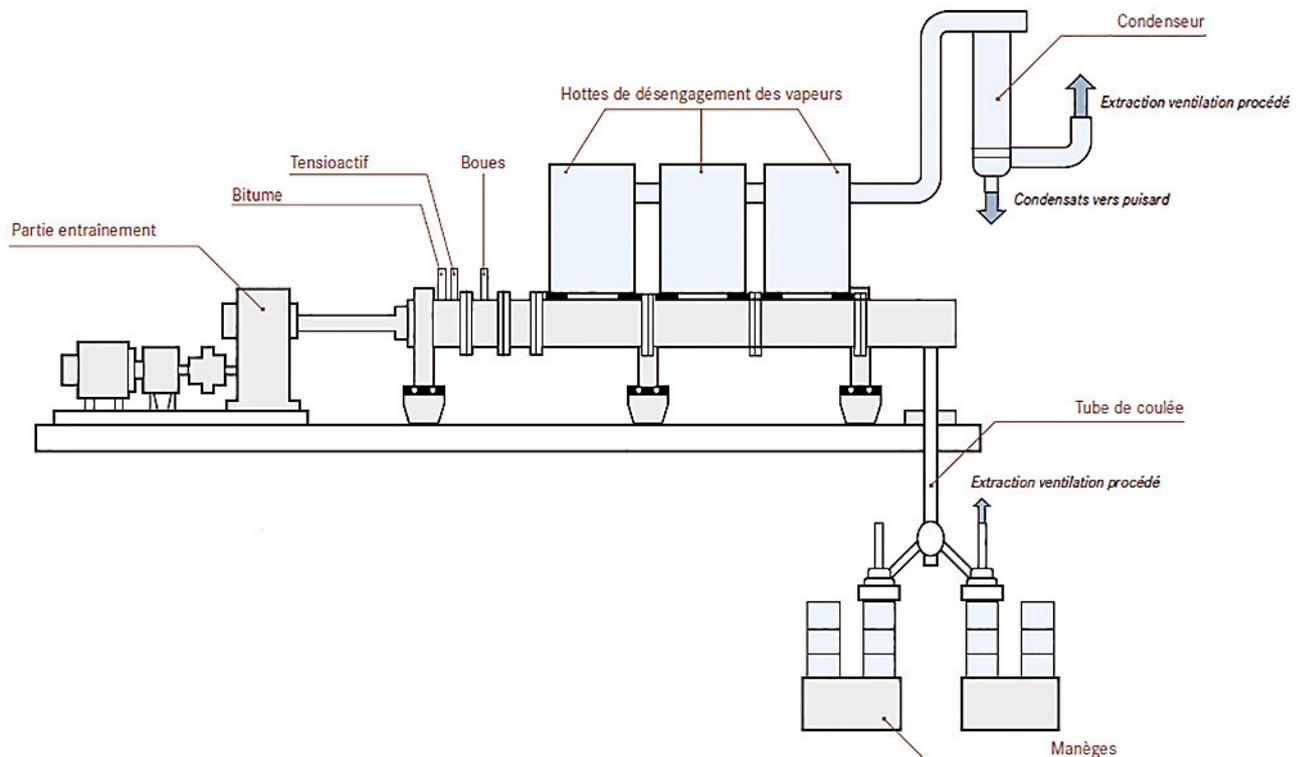


Schéma de principe du procédé de bitumage

VITRIFICATION

La vitrification consiste à mélanger dans un creuset et à haute température des déchets radioactifs généralement liquides, préalablement calcinés, à une fritte de verre dont la composition est adaptée à la nature chimique des déchets afin d'intégrer, à l'échelle atomique, tous les radionucléides présents dans les déchets au réseau vitreux de manière homogène. Le mélange ainsi obtenu est ensuite coulé dans un conteneur en acier inoxydable. Du fait de sa composition chimique et de sa structure amorphe, le verre se révèle particulièrement résistant à l'échauffement et à l'irradiation, et présente une bonne durabilité chimique sur de longues durées.

Mis en œuvre depuis plusieurs décennies sur les sites de Marcoule et de La Hague, ce procédé est aujourd'hui la référence industrielle pour le conditionnement des solutions de produits de fission issues du retraitement des combustibles usés. Des développements technologiques, notamment autour de l'utilisation d'un creuset froid, ont permis, d'une part, de limiter les déchets induits par le procédé et, d'autre part, d'élargir le champ d'application à d'autres types de déchets.

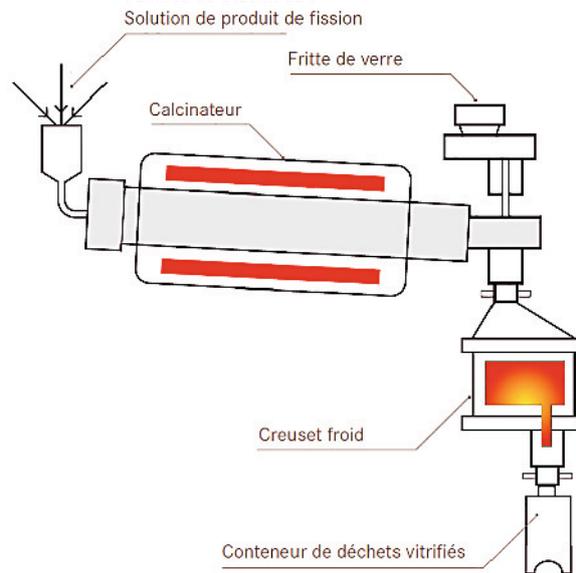


Schéma de principe du procédé de vitrification



LES COLIS DE DÉCHETS VITRIFIÉS

La première mise en œuvre industrielle de la vitrification s'est faite sur le site de Marcoule, en 1978. L'atelier dédié à la vitrification, qui est arrêté depuis 2012, a produit les colis de déchets vitrifiés de haute activité relevant de la famille F1-4-01.

Ces colis de déchets se présentent sous la forme d'un conteneur en acier inoxydable d'environ 1 m de hauteur et 50 cm de diamètre contenant de l'ordre de 360 kg de déchets vitrifiés.

ENROBAGE PAR DES RÉSINES POLYMÈRES

En fonction de leurs caractéristiques radiologiques et physico-chimiques, les déchets solides peuvent également être enrobés par une résine polymère. Ce procédé est notamment mis en œuvre pour conditionner les résines échangeuses d'ions (REI) qui sont utilisées dans les circuits de contrôle volumétrique et chimique du circuit primaire des réacteurs nucléaires, de traitement et purification des eaux de piscines et de traitement des effluents usés.

Ce procédé consiste à mélanger les résines échangeuses d'ions avec une matrice époxy puis à les conditionner dans des conteneurs cylindriques en béton.

Certaines REI sont peu transportables en raison de leurs caractéristiques radiologiques ou physico-chimiques. Il est alors préférable de déplacer le procédé de traitement plutôt que les déchets. En ce sens, les machines mobiles conçues par Centraco de Cyclife permettent de les conditionner dans le respect des spécifications de l'Andra.

LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR LE TRAITEMENT ET CONDITIONNEMENT

PIVIC : VERS UN NOUVEAU PROCÉDÉ POUR TRAITER LES DÉCHETS CONTAMINÉS PAR DES ÉMETTEURS ALPHA

Orano et le CEA, en lien avec l'Andra, développent un nouveau procédé pour traiter les déchets contaminés par des émetteurs alpha. Ce projet porte sur le traitement et le conditionnement des déchets technologiques solides, mélange de métaux et de matières organiques (vinyles, polyéthylène, gants en polymères) issus principalement du fonctionnement de l'usine Melox qui produit le combustible MOX, à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium.

Beaucoup moins radioactifs que les déchets issus du retraitement des combustibles usés, ils doivent cependant être stockés dans des colis adaptés. C'est là qu'interviendrait un procédé innovant, appelé Pivic (Procédé d'incinération-vitrification in can), qui vise à les traiter et les conditionner en une seule étape.

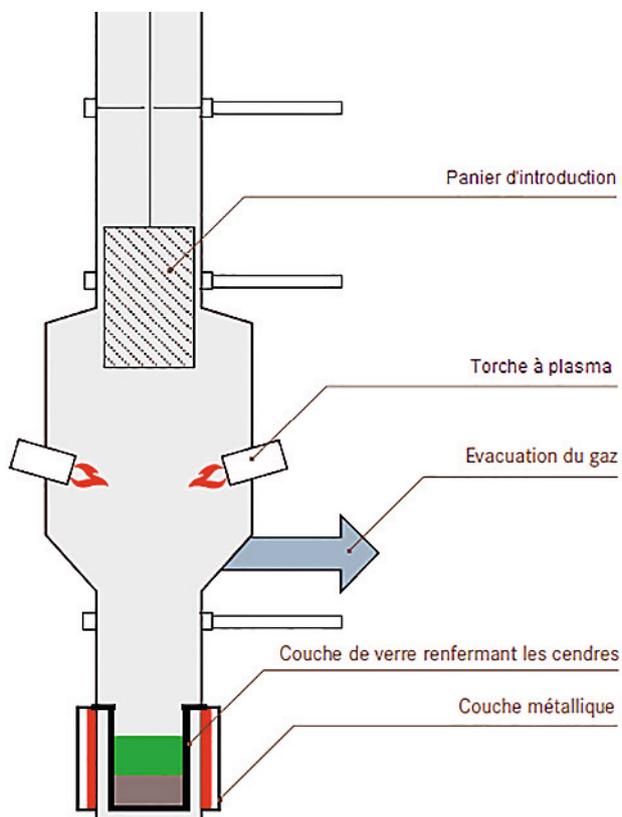


Schéma de principe du procédé Pivic

Le principe consiste à introduire les déchets dans une chambre de combustion et à les incinérer par une torche à plasma placée au-dessus du module de fusion-vitrification. Les cendres résultantes sont ainsi incorporées au verre. Le conteneur de déchets contiendra ainsi une phase métallique en fond de conteneur et une phase verre sur le dessus. Ce colis sera ensuite introduit dans un conteneur adapté pour son stockage.

Ce procédé, aujourd'hui à l'étude, rassemble plusieurs procédés et notamment l'incinération par torches à plasma, la vitrification, la fusion par induction et le traitement des gaz.

Si sa faisabilité est démontrée, la mise en œuvre industrielle du procédé Pivic pourrait avoir lieu au-delà de 2035.

DÉVELOPPEMENT D'UN LIANT HYDRAULIQUE SPÉCIFIQUE POUR LES DÉCHETS MAGNÉSIENS

Les déchets magnésiens entreposés sur le site de Marcoule se présentent sous forme de gaines de magnésium métallique en vrac, broyées ou compactées. Des développements d'un liant hydraulique spécifique (dénommé géopolymère) sont actuellement conduits pour maîtriser les interactions physico-chimiques entre le matériau d'enrobage et les déchets.

Le CEA étudie cette solution de conditionnement en lien avec l'Andra. Si la faisabilité est démontrée, et si l'acceptabilité de mise en stockage est délivrée, le CEA vise un déploiement de ce procédé à court terme sur les déchets magnésiens les plus anciens et les moins actifs (catégorie faible et moyenne activité à vie courte).

DOSSIER

03

Démantèlement et assainissement des installations nucléaires

LE PROCESSUS RÉGLEMENTAIRE	103
LA STRATÉGIE DE DÉMANTÈLEMENT	104
LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT	105
La préparation des travaux de démantèlement	105
La réalisation des travaux de démantèlement	105
La finalisation des travaux de démantèlement	106
LES DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT	107
Les principes de gestion des déchets issus du démantèlement	107
La nature des déchets issus du démantèlement	108
L'estimation des quantités de déchets issus du démantèlement	108
LES OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT EN FRANCE	109
Illustration n° 1 : les sites de SICN	109
Illustration n° 2 : le site du CEA de Grenoble	109
Illustration n° 3 : la centrale nucléaire de Chooz A	110
L'IMPORTANCE DU RETOUR D'EXPÉRIENCE POUR LES FUTURS CHANTIERS DE DÉMANTÈLEMENT	111

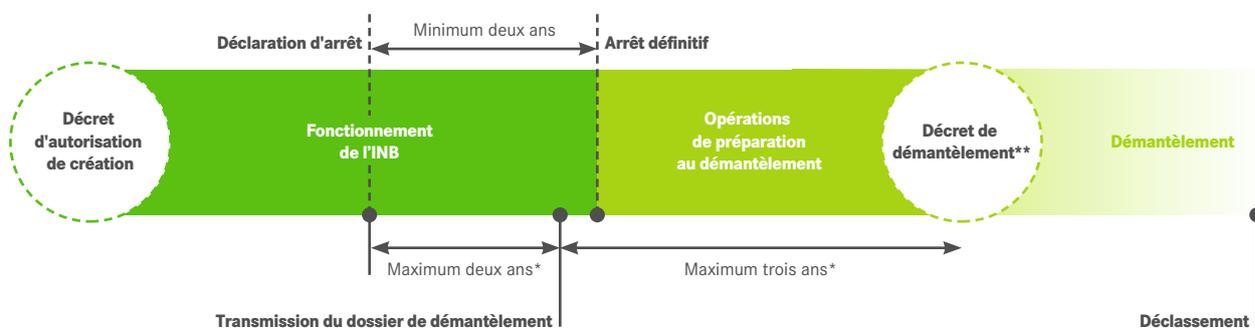
Comme toute activité industrielle, le fonctionnement d'une installation nucléaire s'inscrit sur une durée finie. Lorsque l'exploitant nucléaire, titulaire de l'autorisation d'exploiter l'installation, décide d'arrêter définitivement son fonctionnement, il engage un processus d'opérations qui amèneront l'installation dans un état où l'impact éventuel et le risque résiduel sur le public, les travailleurs et l'environnement seront aussi faibles que raisonnablement possible de telle sorte qu'elle puisse être déclassée de la nomenclature des installations nucléaires.

Cette dernière phase de vie correspond au démantèlement de l'installation nucléaire.

Trois grandes phases constituent ainsi la vie d'une installation nucléaire :

- la phase de construction de l'installation après obtention d'une autorisation de création ;
- la phase de fonctionnement de l'installation après obtention d'une autorisation de mise en service ;
- la phase de démantèlement après la mise à l'arrêt définitif ou cessation d'activité de l'installation.

► PHASES DE VIE D'UNE INSTALLATION NUCLÉAIRE



* Délai prorogeable de deux ans dans certains cas.

** Le décret de démantèlement prend effet à la date à laquelle l'ASN approuve la révision des règles générales d'exploitation et au plus tard un an après la publication du décret.

LE PROCESSUS RÉGLEMENTAIRE

Le démantèlement des installations nucléaires en France est un processus initié en amont de la date d'arrêt définitif d'exploitation prévue par l'exploitant nucléaire, et se poursuit jusqu'à l'obtention du déclassement de l'installation délivrée par l'autorité de contrôle de l'installation nucléaire.

Ce processus est réglementé depuis 2006 et la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire, puis complété par le décret du 2 novembre 2007 modifié et l'arrêté du 7 février 2012. Il est également encadré par le Code de l'environnement et le décret du 28 juin 2016, relatif à la modification, à l'arrêt définitif et au démantèlement des installations nucléaires de base, ainsi qu'à la sous-traitance. Pour une installation donnée, il prévoit :

- une déclaration d'arrêt définitif au ministre chargé de la sûreté nucléaire et à l'ASN, dès lors que l'exploitant envisage d'arrêter définitivement son installation ;
- un décret de démantèlement pris après avis de l'ASN et enquête publique. Ce décret fixe les principales étapes du démantèlement, la date de fin du démantèlement et l'état final à atteindre ;
- des rendez-vous clés avec l'ASN, prévus dans un référentiel de sûreté propre aux opérations de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement ;

- un processus d'autorisation interne de l'exploitant, qui permet d'engager certains travaux dans les limites du référentiel autorisé ;
- des phases préliminaires à l'obtention du décret de démantèlement, durant lesquelles :
 - l'exploitant doit fournir, au moins deux ans avant la mise à l'arrêt définitif, une déclaration de la date à laquelle cet arrêt doit intervenir et doit préciser, en les justifiant, les opérations qu'il envisage de mener, compte tenu de cet arrêt et dans l'attente de l'engagement du démantèlement, pour réduire les risques ou les inconvénients pour le public, les travailleurs et l'environnement,
 - des consultations et des enquêtes publiques doivent être organisées.

Excepté en cas de risques graves ou de risques graves et imminents, c'est l'exploitant d'une installation nucléaire qui décide de l'arrêt de son fonctionnement et avertit l'ASN de cette décision.

DISTINCTION ENTRE « DÉMANTÈLEMENT » ET « DÉCLASSEMENT »

Le « démantèlement » est l'ensemble des opérations techniques qui visent, après l'arrêt définitif d'une installation nucléaire, à l'assainir en éliminant les substances radioactives et dangereuses résiduelles, ainsi que les structures ou les équipements les ayant contenues. Ces opérations sont conduites en vue d'atteindre un état final préalablement défini, notamment en fonction de l'usage futur : démontage des équipements, assainissement des locaux, assainissement ou réhabilitation des sols, destruction éventuelle du génie civil, conditionnement, évacuation et élimination des déchets générés (radioactifs ou non).

Le « déclassé » est, quant à lui, une opération strictement administrative consistant à retirer l'installation de la liste des installations classées. L'installation n'est, dès lors, plus soumise

au même régime juridique et administratif. Le déclassé entraîne la levée des contrôles réglementaires auxquels est soumise une installation classée. Le déclassé peut être accompagné de restrictions d'usage portant sur les terrains situés autour ou au droit de l'installation déclassée.

La démarche de référence recommandée par l'ASN pour le démantèlement d'une installation en vue de son déclassé est de mettre en œuvre un assainissement complet. Cette démarche prévoit « lorsque cela est techniquement possible, d'assainir complètement les sites radiocontaminés, même si l'exposition des personnes induite par la pollution radioactive apparaît limitée », c'est-à-dire de revenir à l'état initial avant activation ou contamination des structures.

LA STRATÉGIE DE DÉMANTÈLEMENT

Deux stratégies sont envisageables pour le démantèlement des installations nucléaires :

- un démantèlement dès la mise à l'arrêt définitif de l'installation. Cette stratégie permet de ne pas faire porter le poids du démantèlement sur les générations futures, tant sur les plans techniques que financiers. Elle permet également de bénéficier des connaissances et des compétences des équipes présentes pendant le fonctionnement de l'installation, indispensables lors des premières opérations de démantèlement. Elle évite, par ailleurs, des dépenses importantes de surveillance, de maintien dans un état de sûreté satisfaisant et éventuellement de jouvence ;
- un démantèlement différé, plusieurs décennies après l'arrêt de l'installation, justifié principalement par la décroissance radioactive des éléments à démanteler permettant des opérations de démantèlement moins complexes et optimisant l'exposition aux rayonnements ionisants des personnes réalisant les opérations de démantèlement. Elle permet également d'étaler les dépenses dans la durée dans l'objectif d'une gestion financière raisonnée.

Le choix dépend des réglementations nationales, des facteurs socio-économiques, de la capacité et du mode de financement des opérations et de la disponibilité des techniques de démantèlement, des personnels qualifiés et des filières d'élimination des déchets.

La stratégie retenue en France, codifiée dans l'article L. 593-25 du Code de l'environnement, est celle du démantèlement dans un délai aussi court que possible, après l'arrêt définitif de l'installation, dans des conditions économiquement acceptables et dans le respect des principes de prévention des risques sanitaires liés à l'environnement et au travail.

LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT

LA PRÉPARATION DES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT

Dès que l'arrêt définitif d'une installation nucléaire ou d'une partie de celle-ci est décidé, une phase de préparation au démantèlement commence. Cette étape de transition permet aux équipes chargées de l'exploitation de l'installation nucléaire, dans le cadre de l'autorisation d'exploitation, de réaliser les opérations préparatoires à la mise à l'arrêt définitif. Il s'agit ainsi de procéder au conditionnement et à l'évacuation du maximum de substances radioactives et dangereuses de l'installation, à la mise à l'arrêt des procédés et à la préparation des opérations

de démantèlement : préparation des chantiers, recherche et investigations radiologiques et chimiques des différentes zones, travaux d'adaptation ou de rénovation si nécessaire de l'installation ou équipement, définition de modes opératoires, formation des équipes, etc.

Par exemple, dans le cas d'un réacteur nucléaire, le combustible est évacué de l'installation. Dans le cas d'une usine de retraitement ou d'une installation de traitement des déchets, les équipements de procédés sont vidangés et rincés.

Pendant cette étape, les fonctions de sûreté et sécurité requises pendant la phase d'exploitation continuent à être assurées.

DÉCLARATION D'ARRÊT DÉFINITIF

Conformément à l'article L. 593-26 du Code de l'environnement, l'exploitant d'une installation nucléaire de base qui prévoit d'arrêter définitivement le fonctionnement de son installation ou d'une partie de son installation le déclare au ministre chargé de la sûreté nucléaire et à l'ASN. Il indique dans sa déclaration la date à laquelle cet arrêt doit intervenir et précise, en les justifiant, les opérations qu'il envisage de mener, compte tenu de cet arrêt et dans l'attente de l'engagement du démantèlement, pour réduire les risques ou les inconvénients pour les intérêts protégés mentionnés à l'article L. 593-1.

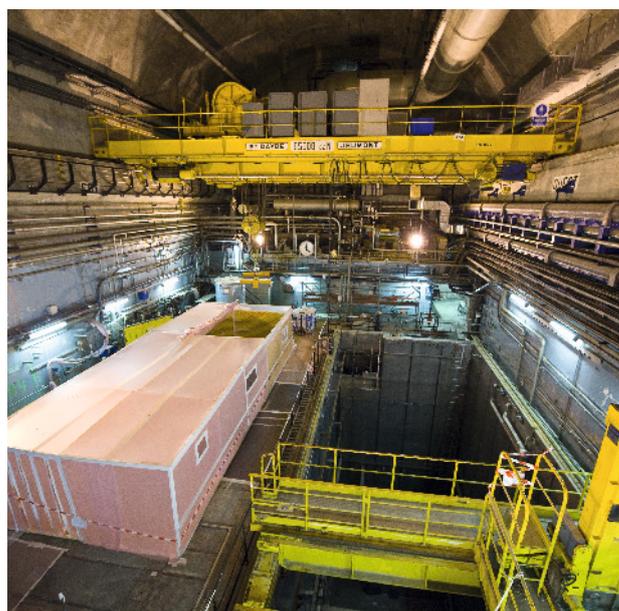
Cette déclaration est faite au moins deux ans avant la date d'arrêt prévue ou dans les meilleurs délais si cet arrêt est effectué avec un préavis plus court pour des raisons que l'exploitant justifie. Cette déclaration doit être accompagnée d'une mise à jour du plan de démantèlement qui présente et justifie la stratégie de démantèlement retenue, les principes et dispositions prises par l'exploitant nucléaire pour le démantèlement de son installation, le déroulement du démantèlement et l'état final envisagé.

LA RÉALISATION DES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT

À l'issue de la phase de préparation à la mise à l'arrêt définitif, l'exploitant engage la phase de démantèlement qui peut s'étaler sur plusieurs années et qui nécessite une autorisation administrative.

Les travaux de démantèlement sont réalisés conformément au référentiel de l'installation et aux prescriptions réglementaires fixées dans le décret de démantèlement, éventuellement complétés par des prescriptions de l'autorité de contrôle.

Les procédures sont adaptées à chaque installation d'après leur historique, les caractérisations et les investigations disponibles, l'accessibilité des zones, etc. Les scénarios sont étudiés en fonction des spécificités des installations ou des équipements, notamment liées à la nature des matériaux et de leur type de contamination pour définir les moyens de confinement, les outillages, les protocoles, les filières de traitement, conditionnement et évacuation des déchets induits, etc.



Démantèlement de la centrale EDF Chooz A



Assainissement d'une cellule blindée de la chaîne Cyrano au centre CEA de Fontenay-aux-Roses

LA FINALISATION DES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT

En France, l'état final à l'issue du démantèlement d'une installation nucléaire doit être tel qu'il permet de prévenir les risques ou les inconvénients que peut présenter le site pour la sécurité, la santé et la salubrité publique ou la protection de la nature et de l'environnement.

La démolition des bâtiments de l'installation nucléaire n'est pas toujours nécessaire pour atteindre cet état final. L'exploitant peut rechercher à réutiliser les bâtiments ou les surfaces qui ont été assainis.

L'ASN recommande que les exploitants mettent en œuvre des pratiques d'assainissement et de démantèlement visant à atteindre un état final pour lequel la totalité des substances dangereuses et des substances radioactives a été évacuée de l'installation.

Dans l'hypothèse où, en fonction des caractéristiques de la pollution, cette démarche poserait des difficultés de mise en œuvre, l'exploitant doit toutefois aller aussi loin que raisonnablement possible dans le processus d'assainissement, en apportant les éléments, d'ordre technique ou économique, qui justifient que la démarche de référence ne peut être mise en œuvre et que les opérations d'assainissement ne peuvent être davantage poussées avec les meilleures méthodes et techniques d'assainissement et de démantèlement disponibles dans des conditions économiques acceptables. L'exploitant intègre, entre autres, dans sa justification, le volume des déchets générés par chacun de ces scénarios ainsi que leur coût respectif.

Dans les cas pour lesquels l'exploitant n'est pas en mesure de démontrer l'absence de risque pour la santé, la salubrité publique ou la protection de la nature et de l'environnement quels que soient les usages, des servitudes d'utilité publique sont instituées. Dans ce cas, le dossier de demande de déclassement fait partie des pièces mises à l'enquête publique pour la mise en œuvre de ces servitudes. Les servitudes d'utilité publique peuvent être instituées à la demande de l'exploitant ou de l'administration (ASN, préfecture, mairie). Celles-ci peuvent contenir un certain nombre de restrictions d'usage (limitation à un usage industriel par exemple) ou de mesures de précaution (conservation de la mémoire, mesures radiologiques en cas d'affouillement, etc.). L'ASN peut subordonner le déclassement d'une installation nucléaire de base à l'institution de telles servitudes.

Par ailleurs, en cas de menace pour les intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du Code de l'environnement, l'ASN peut, à tout moment, même après déclassement de l'installation, prescrire les évaluations et la mise en œuvre des dispositions rendues nécessaires.



Démantèlement d'une installation prototype d'extraction par solvant en colonnes pulsées (INB57) au CEA de Fontenay-aux-Roses

R&D AU SERVICE DU DÉMANTÈLEMENT

Les opérations de démantèlement nucléaire sont des chantiers complexes qui nécessitent différents savoir-faire et technologies spécifiques. Même si une majeure partie des opérations utilise des techniques courantes, adaptées au milieu nucléaire, le développement de méthodes, de procédés et d'outils spécifiques est nécessaire dans certains domaines.

La France a ainsi acquis une compétence reconnue et développe toujours de la R&D dans les domaines :

- de la mesure de la radioactivité en support à la caractérisation initiale et à celle des déchets ;

- de la décontamination des structures et des sols (lasers, mousses, gels, etc.) ;
- de la découpe (procédés laser notamment) ;
- de la robotique en support aux opérations en milieu hostile ;
- de la simulation et des outils de réalité virtuelle en support à la définition de scénarios de démantèlement ;
- du traitement et du conditionnement des déchets et des effluents spécifiques générés par ces opérations.

LES DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT

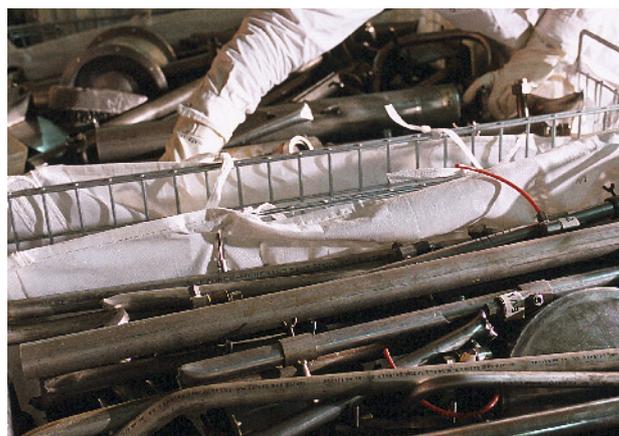
Les déchets induits par les opérations de démantèlement sont de deux types : conventionnels ou radioactifs. Pour identifier les déchets qui relèvent de l'une ou l'autre de ces catégories, les installations sont délimitées en zones qui prennent en compte l'historique de l'installation et les opérations qui y ont été conduites :

- les déchets issus de Zones à déchets conventionnels (ZDC) sont des déchets non radioactifs, qui sont donc éliminés après contrôle vers des filières agréées conventionnelles ;
- les déchets issus des Zones à production possible de déchets nucléaires (ZppDN) sont tous gérés comme s'ils étaient radioactifs, même lorsque les appareils de mesure ne détectent pas de radioactivité, et sont conditionnés et caractérisés pour une prise en charge par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs en vue de leur gestion à long terme.

Le zonage déchets peut être revu entre le fonctionnement et le démantèlement pour prendre en compte les spécificités des différentes phases du fonctionnement et permettre une gestion optimisée des déchets.



Entreposage de déchets de très faible activité (TFA) provenant du démantèlement du réacteur de recherche Triton



Conteneurs métalliques de déchets de très faible radioactivité (TFA)

LES PRINCIPES DE GESTION DES DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT

La politique de gestion des déchets radioactifs du démantèlement s'appuie, comme pour les autres déchets, sur :

- la garantie de la traçabilité des déchets issus des installations nucléaires (zonage déchets, caractérisation, contrôle) ;
- la minimisation du volume des déchets produits ;
- l'optimisation de leur catégorisation ;
- l'envoi en ligne des déchets vers les centres de stockage existants. Dans le cas où les déchets ne disposent pas d'exutoire, ceux-ci sont entreposés dans des installations dédiées.

Les déchets radioactifs sont ainsi triés, subissent éventuellement un traitement puis sont conditionnés (*voir dossier thématique 2*), avant d'être transportés vers les centres de stockage existants adaptés à leur niveau de radioactivité (respectivement Cires pour les déchets TFA et CSA pour les déchets FMA-VC) ou entreposés en attente de l'ouverture de la filière de stockage adéquate.

LA NATURE DES DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT

Les déchets de démantèlement sont en grande partie des déchets conventionnels, notamment des gravats et des métaux. Par exemple, dans le cas de la déconstruction de la centrale nucléaire de Chooz A, 80 % des 40 000 tonnes de déchets produits sont conventionnels et 20 % radioactifs.

Les déchets radioactifs de démantèlement sont majoritairement (> 99 %) de très faible activité (TFA) et de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Il s'agit :

- des matériaux liés à la démolition des installations (béton, gravats, ferrailles, parois de boîtes à gants, tuyauteries, etc.) ;
- des équipements de procédés (pièces métalliques par exemple) ;
- des outils et des tenues de travail (gants, tenues vinyle, etc.) ;
- des effluents qui ont servi au rinçage d'équipements.

Il peut s'y ajouter des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), notamment les déchets de graphite provenant de la première filière française de réacteurs dite « uranium naturel – graphite – gaz » (UNGG) et des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en faible quantité (il s'agit principalement de déchets activés, dont des pièces métalliques situées au cœur des réacteurs).

L'ESTIMATION DES QUANTITÉS DE DÉCHETS ISSUS DU DÉMANTÈLEMENT

Lors de la préparation des opérations de démantèlement, la quantité et la nature des déchets qui seront produits, ainsi que les moyens de traitement et de conditionnement à mettre en œuvre, sont évalués. Ces évaluations prennent en compte la totalité des déchets produits par l'opération, y compris les déchets secondaires induits, par exemple les volumes d'effluents engendrés par la décontamination.

Pour ce faire, en premier lieu, un inventaire rigoureux des installations à assainir, des équipements qu'elles contiennent et de leur niveau de contamination résiduelle est réalisé, ce qui requiert une bonne connaissance de l'historique de fonctionnement de l'installation.

Les quantités de déchets qui seront produites sont alors évaluées sur la base de cet historique de fonctionnement et sur la base du retour d'expérience acquis lors des opérations précédentes de démantèlement.

LES OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT EN FRANCE

Depuis le début des années 1980, des opérations de démantèlement d'installations de R&D, de réacteurs de recherche ou d'installations liées au cycle du combustible, ont été réalisées sur différents sites. Plus d'une trentaine d'installations nucléaires ont ainsi été démantelées et déclassées.

Actuellement, plus d'une cinquantaine d'installations sont en cours de démantèlement ou seront démantelées à moyen terme. Il s'agit :

- d'une dizaine de réacteurs nucléaires, dont la majorité est de technologie et de conception différentes de ceux actuellement en fonctionnement en France ;
- d'une quarantaine d'installations du CEA (réacteurs de recherche ou prototypes, installations de recherche et laboratoires), d'EDF (Atelier des matériaux irradiés) et d'Orano (cycle du combustible).

Les exemples ci-dessous illustrent la diversité des installations nucléaires à démanteler, des difficultés rencontrées, des délais entre la mise à l'arrêt de l'installation et la réindustrialisation du site, ainsi que la capacité de la filière nucléaire française à mener à bien l'ensemble du cycle de vie de ses installations nucléaires, dans le respect de la sécurité et de la sûreté.

ILLUSTRATION N° 1 : LES SITES DE SICN

La Société industrielle de combustible nucléaire (SICN) est une entreprise française, appartenant au groupe Orano, spécialisée à l'origine dans la fabrication de combustible nucléaire pour les réacteurs de recherche, les réacteurs UNGG et les réacteurs à neutrons rapides, puis reconvertie dans la fabrication de pièces et munitions en uranium métal.

La SICN a disposé d'installations (ateliers de fabrication, laboratoire, etc.) à Annecy dès 1954 et à Veurey-Voroize dès novembre 1960.

DÉMANTÈLEMENT D'ANNECY

En 2002, la décision a été prise d'arrêter les activités nucléaires des installations et de lancer le projet d'assainissement et de démantèlement. Ce dernier a été lancé en 2008.

Aujourd'hui, Orano reste propriétaire de l'ensemble des surfaces du site. Celles-ci ont été totalement réindustrialisées notamment par la mise en place en 2015 d'une chaufferie biomasse, d'une puissance de 12 MW, exploitée par la société Idex.

DÉMANTÈLEMENT DE VEUREY-VOROIZE

En 2006, les deux installations nucléaires de base (INB) localisées sur le site de Veurey-Voroize sont mises à l'arrêt définitif :

- usine de fabrication de combustibles nucléaires, INB n° 65 autorisée en 1967 ;
- atelier de pastillage, INB n° 90 autorisée en 1977.

Entre 2006 et 2011 Areva, (aujourd'hui Orano) a entrepris le démantèlement nucléaire des équipements puis l'assainissement des bâtiments.

Depuis la fin des travaux de démantèlement en 2013, l'ensemble des utilités du site est loué à la société Sofradir (Société française d'infrarouge). Celle-ci occupe environ 60 % de la surface du site.

ILLUSTRATION N° 2 : LE SITE DU CEA DE GRENOBLE

Créé en 1956 pour contribuer au développement de la filière électronucléaire française, le centre du CEA de Grenoble a vu ses activités de recherche nucléaire décroître à la fin des années 1990. À partir de 2001, le CEA de Grenoble a entrepris l'assainissement et le démantèlement des six Installations nucléaires de base implantées sur le site :

- l'INB 19 (Mélusine), réacteur nucléaire à l'arrêt depuis 1988 ;
- l'INB 20 (Siloé), réacteur nucléaire à l'arrêt depuis 1997 ;
- l'INB 21 (Siloëtte), réacteur nucléaire à l'arrêt depuis 2002 ;
- l'INB 61 Laboratoire d'analyses et de contrôle des matériaux radioactifs (Lama) ;
- l'INB 36 et 79 Station de traitement des effluents et des déchets (Sted), anciens entreposages de décroissance.

Ces installations nucléaires ont fait d'importants travaux d'assainissement et de déconstruction, ayant permis le déclassé de quatre d'entre elles (INB 19, INB 20, INB 21 et INB 61) et la réutilisation des surfaces pour des activités de R&D en micro-nanoélectronique, en technologies pour la santé et pour les énergies renouvelables.



Démantèlement du réacteur Siloé sur le centre CEA de Grenoble



Démantèlement du Lama sur le centre CEA de Grenoble

ILLUSTRATION N° 3 : LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE CHOOZ A

Située dans les Ardennes, en bord de Meuse, la centrale nucléaire de Chooz compte deux réacteurs en fonctionnement (Chooz B1 et B2) et un réacteur en démantèlement (Chooz A). Mis en service en 1967, ce dernier a fonctionné jusqu'en 1991. Il fait partie des neuf réacteurs actuellement en déconstruction en France par EDF.

Chooz A est la première centrale construite en France de la filière Réacteur à eau pressurisée (REP). Il s'agit d'un projet franco-belge conduit par la Société d'énergie nucléaire des Ardennes (SENA), constituée par EDF et un groupement de producteurs d'électricité belges. Elle a pour particularité d'avoir le réacteur et ses auxiliaires nucléaires (pompes, échangeurs, circuits de refroidissement, etc.) installés dans deux cavernes rocheuses, creusées à flanc de colline dans une boucle de la vallée de la Meuse.

De 2001 à 2004, les principales opérations ont consisté à retirer le combustible, vidanger les circuits, démanteler, assainir et démolir la salle des machines, la station de pompage et les bâtiments nucléaires situés à l'extérieur de la colline. À la suite de ces opérations, 99,9 % de la radioactivité de la centrale étaient évacuée du site.

Après l'enquête publique organisée en août et en septembre 2006, le décret autorisant le démantèlement complet a été signé le 27 septembre 2007. À partir de ce jalon, les opérations ont eu lieu conformément au scénario de référence :

- de 2008 à 2010, préparation aux opérations de démantèlement (création de zones d'entreposage de déchets et de vestiaires, réfection des ventilations et des moyens de levage, etc.) ;
- de 2010 à 2014, assainissement et démantèlement des circuits auxiliaires et du circuit primaire (hors cuve) et évacuation vers les filières de stockage appropriées ;
- de 2015 à 2016, aménagement des ateliers nécessaires au démantèlement de la cuve, création d'un circuit permettant la mise en eau et la filtration de la piscine et démarrage du démantèlement des locaux résiduels de la caverne auxiliaires par des moyens télé-opérés ;
- en 2017, mise en eau de la piscine réacteur, dépose du couvercle de la cuve en vue de son évacuation en 2018.

Les dernières opérations du démantèlement, telles que la découpe, le conditionnement et l'évacuation de la cuve du réacteur, sont planifiées jusqu'en 2022.



Stockage d'un générateur de vapeur de la centrale de Chooz A au Cires



Chantier de déconstruction de la centrale de Chooz A : déconstruction de la caverne

DÉMANTÈLEMENT À L'INTERNATIONAL

À l'échelle mondiale, dans les 20 ans à venir, des dizaines de réacteurs électronucléaires, d'installations de recherche (réacteurs expérimentaux, laboratoires, etc.), d'usines de fabrication et de retraitement de combustible devront être démantelés.

Les plus grands chantiers internationaux sont en Amérique et surtout aux États-Unis, mais aussi en Europe.

L'expertise acquise par les entreprises françaises dans l'ensemble des domaines concernés, de façon intégrée, au travers des opérations de démantèlement menées sur des installations de recherche ou de production depuis plus de 30 ans, les positionne clairement comme étant susceptibles de répondre efficacement aux défis que présentent ces grands chantiers internationaux.

L'IMPORTANCE DU RETOUR D'EXPÉRIENCE POUR LES FUTURS CHANTIERS DE DÉMANTÈLEMENT

Au fur et à mesure de la réalisation de chantiers de démantèlement, en France et à l'international, le retour d'expérience s'enrichit et alimente les futurs projets de démantèlement. Les principaux enseignements tirés sont :

- l'importance de la prise en compte des difficultés intrinsèques aux opérations de démantèlement telles que le travail en milieux irradiants, la vétusté de certaines installations, les évolutions réglementaires, la disponibilité des exutoires pour les déchets produits ;
- une définition précise de l'état initial (nature et quantité des déchets à produire, caractérisation de l'état radiologique, etc.) et de l'état final permettant une meilleure évaluation des moyens nécessaires à l'atteinte des objectifs.

DOSSIER

04

Les sites pollués par la radioactivité

ORIGINE DE LA POLLUTION RADIOACTIVE 113

**IDENTIFICATION DES SITES POLLUÉS
PAR LA RADIOACTIVITÉ** 114

**GESTION DES SITES POLLUÉS
PAR LA RADIOACTIVITÉ** 115

GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS 117

**EXEMPLES DE CHANTIERS D'ASSAINISSEMENT
RÉALISÉS PAR L'ANDRA** 118

Les parcelles de l'ancienne Société nouvelle du radium
à Gif-sur-Yvette 118

L'ancienne usine Orflam-Plast à Pargny-sur-Saulx 119

Les sites pollués par les substances radioactives ne représentent qu'une très faible part de l'ensemble des sites pollués en France.

Cette pollution peut résulter d'activités industrielles, médicales ou de recherche impliquant des substances radioactives. La pollution peut concerner les lieux d'exercice de ces activités ainsi que leur voisinage, immédiat ou plus éloigné. La plupart des sites pollués par des substances radioactives renvoient à des activités industrielles ou artisanales du passé, à une époque où la perception des risques liés à la radioactivité n'était pas la même qu'aujourd'hui.

Les sites pollués par des substances radioactives appellent une action des pouvoirs publics à titre préventif ou curatif.

i

« Site pollué par des substances radioactives : site qui, du fait d'anciens dépôts de substances ou déchets radioactifs, d'utilisation ou d'infiltration de substances radioactives ou d'activation radiologique de matériaux, présente une pollution radioactive susceptible de provoquer une nuisance ou un risque durable pour les personnes ou l'environnement ¹. »

La pollution constatée doit être imputable à une ou plusieurs substances radioactives, telles que définies par l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement, à savoir toute « substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection ».

ORIGINE DE LA POLLUTION RADIOACTIVE

Les sites pollués par la radioactivité sont pour la plupart des sites anciens ayant abrité des activités qui ne relevaient pas de l'industrie électronucléaire. Les substances qui ont pu contribuer à la pollution de sites sont :

- le radium : son extraction, son entreposage, sa manipulation et sa commercialisation pour des applications diverses dont la médecine, la parapharmacie et la fabrication de peinture pour la vision nocturne, sont responsables d'une grande partie de la pollution radioactive en France ;
- le tritium : utilisé pour la vision nocturne dans la fabrication de peinture en remplacement du radium ;
- la monazite, minéral naturellement radioactif utilisé entre autres pour la fabrication de pierres à briquet (ancienne usine Orflam-Plast à Pargny-sur-Saulx) ;
- les sables naturels riches en zircons, minéraux naturellement et faiblement radioactifs utilisés dans la fabrication d'oxyde de zirconium.

Par méconnaissance des risques pour la santé et l'environnement, ces substances radioactives étaient le plus souvent manipulées avec des précautions minimales voire nulles.

Révolution
dans l'automobile
Enfin une bougie au Radium.

Adoptée par l'Armée. Brevetée S. G. D. G. France et étranger.

La bougie radio-active HELITA-RADIUM incandescence considérablement le phénomène de l'ionisation que tous les automobilistes ont observé au coucher du soleil ou en traversant les forêts.

HELITA RADIUM ATOMISE LES GAZ
On sait que le Radium possède les propriétés suivantes :
1° Il émet des « ions » qui rendent l'air conducteur, « condense » l'électricité d'une bougie au Radium est plus chaude et plus noire. On obtient donc un meilleur allumage.

HELITA RADIUM IONISE LES GAZ
2° Il transforme l'oxygène de l'air en « Ozone » qui active la combustion du mélange gazeux.
3° Il produit un « Bombardement atomique » qui désagrège les molécules des Carburants. Ces gaz sont ainsi plus aisément et complètement brûlés.

AVANTAGES DE LA BOUGIE HELITA RADIUM :
Démarrage facilité : Le moteur part facilement même aux basses températures.
Meilleur rendement : Conséquence d'un meilleur allumage et d'une combustion merveilleuse et souplesse accrues, active des gaz.
Clignotage nettement amélioré : Ce qui permet de pousser l'avance.
Augmentation de puissance — Meilleure motricité des câbles.
Plus d'auto-allumage : La combustion totale des gaz supprime l'encrassement et le claquage.

...et surtout importante économie d'essence.

Une voiture de 4 cylindres consommant 12 litres aux 100 kilomètres avec bougies ordinaires en consommant 10 lit. 5 avec les bougies HELITA RADIUM FRANCE.

Un camion léger 250 kilomètres par jour réalise une économie de 15.000 francs par an. En un seul voyage PARI-ROME, un autocar plein des bougies HELITA RADIUM FRANCE par l'économie d'essence réalisée en moins d'une heure que la normale (sans compter).

Où est le RADIUM ?
Il se trouve incorporé dans l'isolant au voisinage des pointes.

L'INSTITUT DU RADIUM PARIS
(Laboratoire Curie)
« constate qu'une bougie HELITA est radio-active. Certificat n° 370, série 2 »

Publicité des années folles du radium

1 Annexe 13-7 du Code de la santé publique

LE RADIUM

Le radium est présent en très petite quantité sur terre, sous la forme de plusieurs isotopes dont le plus abondant est le radium 226, émetteur alpha et gamma, dont la période est de 1 600 ans. Le radium 226 est extrait des minerais d'uranium où il est présent à l'état de traces. Des usines d'extraction de radium ont ainsi vu le jour en France et ont pu être à l'origine de la pollution de ces sites industriels.

Au début du xx^e siècle, l'intérêt thérapeutique du radium a été mis en avant pour détruire des tissus malades. Devant les résultats spectaculaires obtenus, une véritable ferveur populaire pour le radium a vu le jour dans les années 1920-1930.

À cette époque, une grande quantité de produits parapharmaceutiques, manufacturés et autres (poudres, cosmétiques, laines, aliments pour bétail, bougies de voitures, fontaines, peintures luminescentes pour l'horlogerie et l'aviation, etc.) a été commercialisée en France.

À la fin des années 1950, leur fabrication, leur production et leur commercialisation ont été interdites en raison des dangers liés à leur radioactivité.

Le radium également utilisé à l'époque pour ses propriétés radioluminescentes a été remplacé par des radionucléides artificiels, tel que le tritium.

Cet engouement prend fin lorsque les dangers de la radioactivité sont reconnus et l'utilisation du radium interdite. La mémoire d'une grande partie des sites industriels qui s'étaient développés pendant les « années folles » du radium a été perdue. Certains sites, généralement situés dans des zones urbaines, ont été réaménagés malgré leur pollution radioactive ou sont restés à l'état de friches industrielles.

Néanmoins, la pollution encore présente sur ces sites peut nécessiter un assainissement afin de réduire les risques pour la santé et l'environnement.



Usine d'horlogerie Bayard – Ouvrière au travail

IDENTIFICATION DES SITES POLLUÉS PAR LA RADIOACTIVITÉ

L'identification des sites pollués est un travail complexe car la mémoire de ces sites n'a pas toujours été conservée. Les sources d'information pour identifier ces sites sont variées. Le travail d'inventaire et de recensement est un travail permanent, mis à jour au fur et à mesure de l'identification de nouveaux sites.

L'étude historique conduite en 1996 par l'Observatoire de l'Andra en collaboration étroite avec l'Institut Curie a permis

de retrouver ces sites, entraînant des opérations de contrôle de radioactivité sur plusieurs dizaines d'entre eux qui ont pu être suivies d'actions directes de mise en sécurité et/ou d'assainissement.

Le rôle de l'Observatoire dans ces contrôles et actions a été d'alerter les services de l'État, à l'exclusion de toute initiative sur place. Il a également permis de déclencher une opération de collecte nationale d'objets au radium d'utilisation médicale.

L'INFORMATION AU PUBLIC

La politique de gestion des sites et sols pollués ou susceptibles de l'être s'est d'abord fondée sur un important travail de recensement. Puis, suivant les avancées des autres pays dans ce domaine, la politique de réhabilitation et de traitement des sites s'est infléchie à la fin des années 1990 vers une politique de gestion des risques en fonction de l'usage. Fondée sur l'examen et la gestion du risque, plus que sur le niveau de pollution intrinsèque, cette politique nécessite de garder la mémoire des pollutions et des actions de réhabilitation mises en œuvre, mais aussi de fixer des usages des sols compatibles avec les pollutions résiduelles après traitement du site.

Afin d'améliorer l'information du public sur les sites pollués par la radioactivité et d'encadrer les constructions sur de tels sites pour garantir l'absence de risques sanitaires (*voir article L. 556-1 du Code de l'environnement*), le législateur a créé les Secteurs d'information sur les sols (SIS).

Les SIS impliquent, pour les projets de construction ou de lotissement, la réalisation d'une étude de sol dont le contenu est détaillé à l'article R. 556-2 du Code de l'environnement.

Deux bases de données accessibles depuis le portail Géorisques du gouvernement répertorient les sites pollués par la radioactivité, il s'agit de :

- **l'espace Basias** du site Géorisques (georisques.gouv.fr/dossiers/basias) créé en 1998 qui recense tous les sites industriels abandonnés ou non, susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement, afin de conserver la mémoire de ces sites et de fournir des informations utiles aux acteurs de l'urbanisme, du foncier et de la protection de l'environnement ;

- **l'espace Basol** (basol.developpement-durable.gouv.fr/home.htm) qui recense les sites pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif.

Enfin, au titre de la surveillance des expositions de la population et de l'information du public, les doses individuelles moyennes reçues par la population du fait des activités nucléaires autorisées sont rendues publiques. Estimées au moins tous les cinq ans par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, ces informations font l'objet d'un rapport public publié sur le site Internet de l'Institut (*article R. 1333-27 du Code de la santé publique*).

Bien qu'il n'y ait jamais eu d'obligation réglementaire, l'Inventaire national a permis de recenser et de garder la mémoire des sites pollués par la radioactivité sur le territoire français jusqu'en 2015. En effet, l'Andra recensait tous les ans l'ensemble des sites pollués par la radioactivité, en collaboration avec l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR). Dorénavant, en accord avec le ministère en charge de l'environnement, les informations relatives aux sites pollués ne sont plus restituées dans l'Inventaire national mais sont regroupées sur le portail d'information Géorisques.

L'Inventaire national se focalise uniquement sur les matières et déchets radioactifs, les déchets issus de l'assainissement des sites pollués y sont donc toujours répertoriés.

GESTION DES SITES POLLUÉS PAR LA RADIOACTIVITÉ

La gestion des sites pollués par des substances radioactives s'inscrit dans le cadre général de la politique nationale de gestion des sites et sols pollués (*articles L. 556-1 à L. 556-3 et R. 556-1 à R. 556-5 du Code de l'environnement*) dont la mise en œuvre est détaillée au terme de la note du 19 avril 2017 relative aux sites et sols pollués.

Le principe pollueur-payeur fixé par le Code de l'environnement définit le principe général pour la gestion des sites pollués. Lorsque le responsable d'un site pollué est identifié, il prend lui-même les mesures nécessaires pour en assurer

l'assainissement. L'Andra peut également intervenir sur ces sites en assistance à maîtrise d'ouvrage. Le pollueur d'un site doit, dès lors qu'il est solvable, assurer le financement des opérations d'assainissement et de réaménagement du site pollué jusqu'à élimination des déchets.

Lorsque le pollueur est défaillant (le site est alors dit « orphelin »), ce sont les pouvoirs publics qui prennent en charge l'assainissement et la réhabilitation de ces sites en faisant intervenir l'IRSN et l'Andra. La plupart des sites pollués historiques sont des sites à responsable défaillant.

UNE MISSION DE SERVICE PUBLIC

La loi de programme du 28 juin 2006 définit les missions de l'Andra parmi lesquelles elle doit assurer « (...) la collecte, le transport et la prise en charge de déchets radioactifs, d'assurer la remise en état et, le cas échéant la gestion, de sites pollués par des substances radioactives, sur demande et aux frais de leurs responsables » (*article L. 542-12 du Code de l'environnement*).

La mission « sites pollués », créée au sein de l'Agence, a ainsi pour rôle d'animer et de coordonner la collecte et la prise en

charge d'objets radioactifs à usage familial et l'assainissement de sites pollués par la radioactivité dont le responsable est défaillant. Agissant pour le compte du maître d'ouvrage, la mission sites pollués élabore les scénarios de réhabilitation, obtient les financements et autorisations nécessaires, puis spécifie les travaux et les fait réaliser en s'appuyant sur un réseau d'entreprises spécialisées.

Plusieurs acteurs interviennent et collaborent pour gérer les sites pollués :

- l'IRSN réalise les diagnostics initiaux des sites pollués et évalue les risques pour le public et pour l'environnement ;
- l'ASN fixe les règles techniques auxquelles doit satisfaire l'élimination des déchets radioactifs et s'assure que les sites identifiés comme contaminés sont mis en sécurité pour le public et pour l'environnement. Elle contrôle également l'application des règles de radioprotection pour les travailleurs intervenants sur les chantiers d'assainissement ;
- la CNAR (Commission nationale des aides dans le domaine radioactif), créée en 2007 par l'Andra pour donner un avis sur l'utilisation de la subvention publique uniquement pour les sites orphelins, sur la nécessité ou non de dépolluer un site, sur les priorités d'attribution des fonds, les stratégies de traitement des sites pollués et sur les questions de prise en charge des déchets. La CNAR est présidée par le directeur général de l'Andra et comprend entre autres :
 - des représentants des autorités,
 - des représentants des établissements publics techniques,
 - des représentants du monde associatif,
 - un élu désigné par l'association des maires de France ;
- l'Andra peut assurer la maîtrise d'ouvrage ou l'assistance à maîtrise d'ouvrage et complète la caractérisation fine du site si nécessaire, notamment quant aux pollutions plus profondes, puis établit le projet d'assainissement, le présente aux parties prenantes (validation par la CNAR selon les cas de figure) ; elle assure également la prise en charge des déchets radioactifs qui en résultent ;
- la préfecture ordonne et encadre réglementairement les travaux d'assainissement par arrêté préfectoral et en assure le suivi en s'appuyant sur les DREAL pour les anciens sites industriels et sur l'ASN pour les aspects de radioprotection.

Le diagnostic d'un site est mené dès lors qu'il existe une suspicion de contamination. C'est une phase de recueil des connaissances qui doit être menée de façon détaillée qui comprend entre autres une étude documentaire historique et de vulnérabilité.

La caractérisation de terrain vise en premier lieu à confirmer ou infirmer la présence des pollutions radioactives suspectées puis, le cas échéant, à en déterminer la localisation, la nature et le niveau afin de définir les objectifs d'assainissement.

Dès lors qu'une exposition est mise en évidence, il convient de déterminer si la pollution constatée est compatible ou non avec l'usage établi ou envisagé du site et de rechercher les actions de réduction de l'exposition adaptées et proportionnées à la situation rencontrée.

La définition des objectifs de gestion doit être établie dans le respect du principe d'optimisation applicable en radioprotection en tenant compte des caractéristiques des pollutions, de la nature des usages existants ou prévus et du projet de réaménagement.



Chantier de démolition d'une maison contaminée à Gif-sur-Yvette

Conformément aux principes de radioprotection précisés à l'article L. 1333-2 du Code de la santé publique, le bilan coût/avantage, qu'il importe d'établir dès lors qu'on se trouve dans le cadre d'un plan de gestion, doit en premier lieu viser à réduire autant que raisonnablement possible l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants résultant de l'usage du site et des opérations de réhabilitation.

Ainsi en fonction des spécificités de chaque site pollué et de l'usage futur du site, il est possible, soit de dépolluer totalement le site pour le rendre apte à tous les usages et sans contrainte, soit de maintenir une pollution résiduelle et en maîtriser l'impact en limitant les usages possibles, en mettant en place des barrières. Ces précautions sont pérennisées par des servitudes d'usage intégrées dans des documents d'urbanisme. Par exemple, la construction ou les plantations peuvent être interdites.

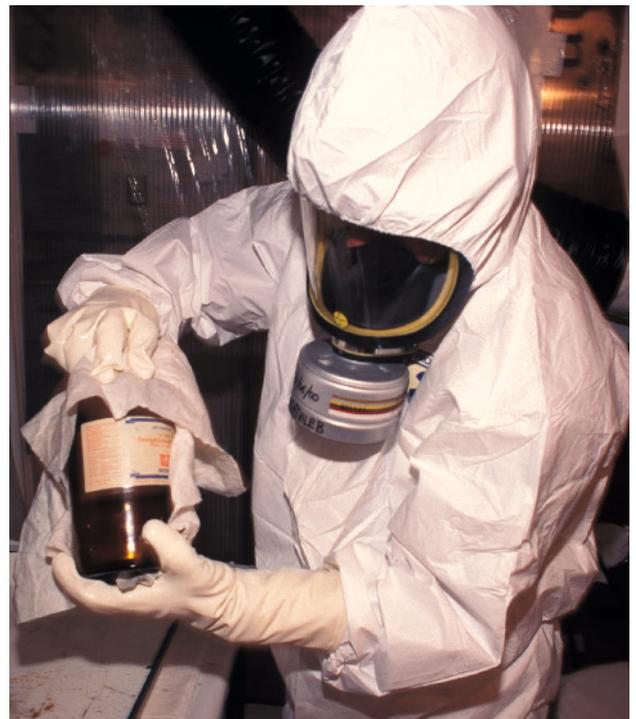
Après réhabilitation d'un site, la mémoire des pollutions et des réhabilitations passées est conservée notamment grâce aux bases de données Basias et Basol et aux SIS.

Dans la pratique, dès lors qu'une pollution est mise en évidence, le site est sécurisé par la mise en place de clôtures, de barrières et d'une signalisation adéquate. Lorsque l'Andra est en charge de l'assainissement d'un site, elle l'effectue en plusieurs étapes :

1. la préparation : des protections sont mises en place (par exemple : nappes vinyles, sas, aspiration des poussières, etc.) pour prévenir toute dispersion de substances contaminées dans l'environnement ;
2. les travaux de réhabilitation : les matériaux contaminés sont enlevés et conditionnés par du personnel qualifié et spécialisé ;

3. la prise en charge : les déchets radioactifs engendrés par l'assainissement (terres, gravats, objets, etc.) sont orientés vers la filière de gestion adaptée à leur nature (centre de stockage ou entreposage) ;

4. la rénovation-réaménagement : des travaux sont réalisés si besoin.



Travaux d'assainissement à l'institut Curie

GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

L'assainissement des sites pollués produit des déchets radioactifs.

Les volumes et les caractéristiques des déchets radioactifs susceptibles d'être produits lors de l'assainissement du site pollué sont évalués dès la définition des scénarios d'assainissement. Compte tenu de la typologie des sites pollués, les déchets produits sont principalement constitués de gravats, de terres, de bois ainsi que de déchets technologiques (tenues d'intervention, outillages, etc.).

Les opérations de tri des déchets sont pensées et effectuées dans l'objectif de réduire la quantité de déchets radioactifs produits et de respecter les critères d'acceptation et les modes

de conditionnement des centres de stockage ou d'entreposage. Les déchets doivent donc être caractérisés avant leur expédition pour justifier leur prise en charge dans la filière adaptée.

Les déchets produits lors de l'assainissement d'un site pollué sont majoritairement des déchets TFA, qui en tant que tels sont expédiés au Cires (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage de l'Andra) ou stockés *in situ* si les quantités de déchets sont trop importantes. Plus rarement, des déchets FA-VL peuvent également être produits. Dans ce cas, ils sont également expédiés au Cires, pour entreposage, dans l'attente de l'ouverture d'un centre de stockage adapté.

Les polluants chimiques présentant des conditions d'acceptation particulières dans les différentes installations d'élimination doivent faire l'objet d'une attention spécifique.

Les déchets sont conditionnés en big-bags ou en conteneurs métalliques injectables, parfois après avoir été temporairement placés en fûts plus petits. En effet, du fait de la localisation des sites en milieu urbain (la majeure partie des sites se trouvant à Paris ou en Île-de-France), il est quelquefois nécessaire de constituer d'abord des fûts de 120 litres, faciles à manipuler. Transportés sur une plateforme d'entreposage, ces fûts sont ensuite vidés, et les déchets reconditionnés dans leur emballage définitif.



Chantier d'assainissement d'une habitation parisienne (le salon)

EXEMPLES DE CHANTIERS D'ASSAINISSEMENT RÉALISÉS PAR L'ANDRA

LES PARCELLES DE L'ANCIENNE SOCIÉTÉ NOUVELLE DU RADIUM À GIF-SUR-YVETTE

Au début des années 1900, la Société nouvelle du radium est créée sur la commune de Gif-sur-Yvette.

Elle comprend :

- un Laboratoire d'essais des substances radioactives (LESR) implanté dans le quartier des Coudraies ;
- une usine d'extraction du radium situé dans le quartier voisin du Clos-Rose.

L'usine a fonctionné entre 1913 et 1935 et le laboratoire jusqu'à la fin des années 1950. À sa fermeture, les bâtiments ont été démolis pour faire place à un lotissement, dont le sol présente, par endroits, quelques zones de pollution.

C'est dans ce cadre que l'Andra est intervenue sur deux parcelles résidentielles de ce quartier afin d'effectuer des travaux d'assainissement. Chacune de ces parcelles abritait une maison édifée dans les années 1960 sur un sol déjà pollué,

avec une teneur en radon dans les habitations, supérieure aux recommandations sanitaires.

Les études techniques et économiques préalables ont montré qu'il n'était pas possible de retirer les terres polluées situées sous les maisons sans démolir ces dernières. C'est pourquoi l'État a décidé de racheter les deux parcelles à leurs propriétaires et les affecter à un usage de type « espace vert ».

Le chantier de réhabilitation, commencé en septembre 2013, a duré une année. Après démolition des maisons, les terres les plus polluées ont été extraites et éliminées, et la faible pollution résiduelle présente en fond de fouille a été confinée sous une épaisseur de terre saine comprise entre 50 cm et plusieurs mètres. Des restrictions d'usage sont en vigueur sur le quartier afin de prévenir les creusements au-delà de la couche de terre saine (documents d'urbanisme et cadastre).

Au total, ce sont 339 m³ de déchets TFA et 0,2 m³ de déchets FA-VL qui ont été produits et expédiés vers le Cires pour stockage pour les premiers et entreposage pour les seconds.



Chantier 1 : avant assainissement



Chantier 1 : après assainissement

L'ANCIENNE USINE ORFLAM-PLAST À PARGNY-SUR-SAULX

La société Orflam-Plast a fabriqué des briquets jusqu'en février 1997, date à laquelle elle a cessé ses activités suite à une liquidation judiciaire.

Ces activités ont notamment concerné, entre 1932 et 1967, le traitement d'un minerai riche en thorium, la monazite, dont était extrait le cérium, nécessaire à la confection des pierres de briquet. L'extraction a conduit à la production de résidus de thorium 232, matériau faiblement radioactif à vie longue, concentrant la radioactivité initialement présente dans la monazite. Ces résidus ont contaminé le site de l'usine, mais aussi les berges de la Saulx, rivière qui borde le site. L'État est devenu propriétaire du site en 2009 pour pallier l'absence de propriétaire. Dès 1997, les travaux de mise en sécurité les plus urgents ont été menés. Ces travaux ont consisté à recouvrir les berges contaminées d'un écran imperméable, de manière à protéger le public susceptible de séjourner sur ces berges (pêcheurs). En 2008 et 2009, deux zones polluées extérieures au site ont été mises en évidence à quelques centaines de mètres de l'usine : la Peupleraie. D'après

le témoignage d'un ancien employé, des rebuts de traitements riches en thorium 232 ont été enfouis sur cette zone et vers l'étang de la Gravière. Ces zones ont immédiatement fait l'objet d'une mise en sécurité : balisage et clôture. Pour compléter les recherches, une vaste opération de prospection radiologique a été menée en juin 2009. Cette prospection n'a mis en évidence aucune autre zone contaminée. En décembre 2009, la CNAR a donné son accord pour la réhabilitation de l'étang de la Gravière, la mise en sécurité du site de la Peupleraie, la démolition des bâtiments de l'usine et le confinement des gravats de démolition *in situ* avec un aménagement pérenne.

Les terres contaminées autour de l'étang ont été en partie extraites et évacuées. La zone ainsi traitée est maintenant ouverte au public et aux pêcheurs. Les arbres de la peupleraie ont été abattus, broyés sur place et recouverts d'une couche d'argile. Enfin, tous les bâtiments de l'ancienne usine ont été démolis. Les gravats très faiblement radioactifs issus de la démolition ont été rassemblés sur place, sous des milliers de tonnes d'argile et de terre assurant aujourd'hui un confinement durable et sûr pour les riverains. Les ouvrages hydrauliques ont été reconstruits et les berges de la Saulx consolidées localement.



Usine Orflam-Plast



Vue aérienne de l'ancien site contaminé Orflam-Plast à Pargny-sur-Saulx après réhabilitation

DOSSIER

05

Les déchets radioactifs du secteur médical

UN PEU D'HISTOIRE **121**

La radiothérapie	121
Le diagnostic en médecine nucléaire	122

L'UTILISATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS **122**

En médecine nucléaire	122
Le diagnostic <i>in vivo</i>	122
Le diagnostic <i>in vitro</i> : la radio-immunologie	125
La radiothérapie métabolique	127
En radiothérapie	128
La radiothérapie externe	128
La curiethérapie	129
La protonthérapie	130

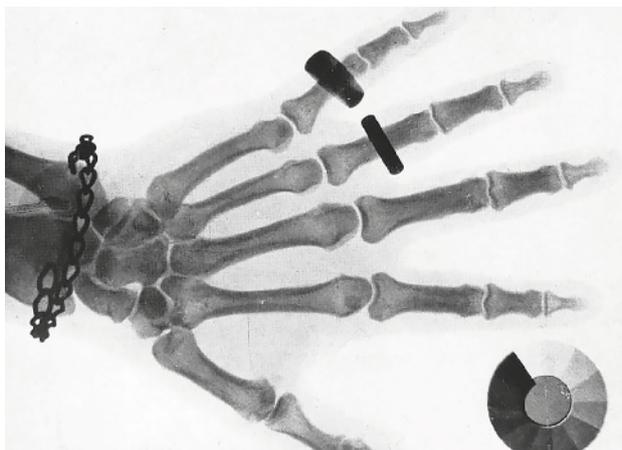
LES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR MÉDICAL **130**

Leur nature	130
Leur gestion	131
La gestion des déchets contaminés	131
La gestion des effluents liquides radioactifs	133
La gestion des effluents gazeux radioactifs	133
Le cas particulier des accélérateurs linéaires de particules	133

UN PEU D'HISTOIRE

LA RADIOTHÉRAPIE

La découverte en 1895 des rayons X par Röntgen marque le début de la radiothérapie, puisqu'un an plus tard, des médecins utilisent pour la première fois ces rayons pour soigner une tumeur. Suite à la découverte de la radioactivité en 1896 et du radium en 1898, Pierre Curie et Henri Becquerel publient un écrit¹ en 1901 qui témoigne de l'effet énergétique des rayons du radium sur la peau, engendrant des lésions cutanées. Cet écrit est le point de départ de l'utilisation du radium en médecine pour guérir les infections dermatologiques et les cancers. Rapidement, les traitements aux rayons X et au radium connaissent leurs premiers développements.

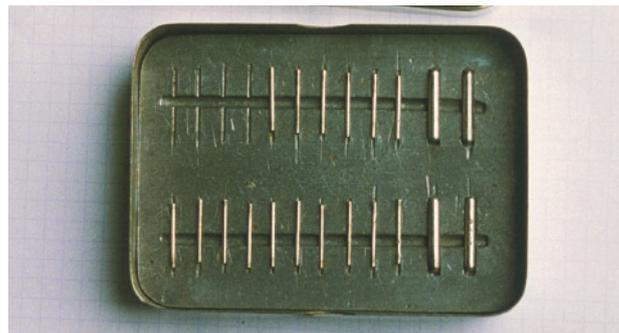


Cliché radiographique d'une main

Les médecins ont d'abord utilisé des tubes à rayons X, dispositifs composés d'une cathode et d'une anode émettant des rayons X, pour soigner les tumeurs. Toutefois, les rayons X issus de ces tubes n'ont qu'une faible énergie et ne pénètrent pas profondément sous la peau. Ils étaient donc essentiellement utilisés pour traiter les cancers de la peau. C'est un peu plus tard, avec l'utilisation du radium (élément extrêmement rare) que des traitements pour soigner d'autres types de cancers commencent à se développer. En effet, le radium émet des rayonnements de plus haute énergie qui peuvent atteindre les tumeurs plus profondes.

De petits sachets en plastique contenant de la poudre de radium mis au contact de la peau sont d'abord utilisés par les médecins pour soigner les tumeurs et les lésions de la peau. Puis, en 1920, le radium est conditionné en petits tubes et en aiguilles.

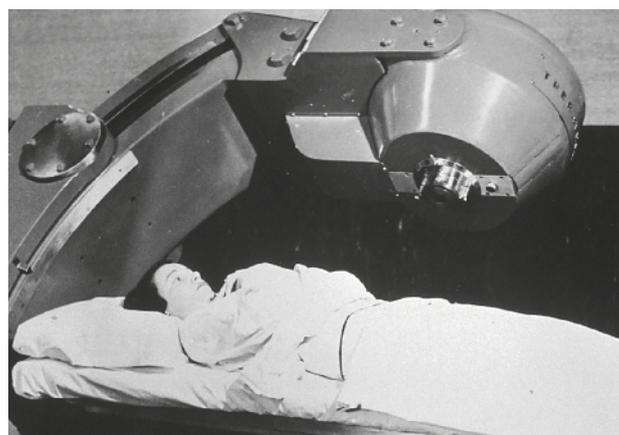
C'est le début de la curiethérapie, technique consistant à traiter les cancers avec des sources radioactives placées au contact des tumeurs, ou implantées directement dans ces tumeurs.



Aiguilles au radium

Avec la découverte de la radioactivité artificielle en 1934, l'utilisation du radium va progressivement décliner au profit des radioéléments artificiels plus adaptés aux traitements et moins onéreux. Ainsi, de nouvelles sources radioactives sont mises à disposition des radiothérapeutes qui remplacent le radium par du césium 137, de l'iridium 192 et de l'iode 125.

À partir de 1955, des sources de cobalt produisant des rayonnements de haute énergie plus pénétrants sont utilisées dans des « bombes à cobalt » permettant une meilleure irradiation des tumeurs tout en limitant celle des tissus sains. À la fin des années 1960, les « bombes à cobalt » sont remplacées par les accélérateurs de particules, plus performants et toujours utilisés de nos jours.



Bombe au cobalt

¹ *Physiologie - Action physiologique des rayons du radium*. Note de Henri Becquerel et Pierre Curie

LE DIAGNOSTIC EN MÉDECINE NUCLÉAIRE

En 1913, Georg von Hevsey emploie pour la première fois la méthode des traceurs radioactifs : il arrose des plantes avec de l'eau contenant un radioélément, le plomb 210, et suit son mouvement dans les plantes en mesurant la radioactivité dans les racines, les tiges puis les feuilles. Onze ans plus tard, en 1924, deux médecins injectent à des patients du bismuth 214 utilisé comme traceur

pour déterminer la vitesse de circulation du sang en mesurant la radioactivité dans le corps du patient : c'est le début de la médecine nucléaire. Ensuite, le radiodiagnostic ne se développe réellement qu'avec la découverte des radioéléments artificiels en 1934 et la découverte du technétium 99m en 1937, radioélément le plus utilisé encore aujourd'hui en médecine nucléaire du fait de sa faible période (six heures), son coût, sa disponibilité et sa capacité à être associé à de nombreuses molécules.

L'UTILISATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS

EN MÉDECINE NUCLÉAIRE

La médecine nucléaire regroupe l'ensemble des utilisations des radioéléments en sources non scellées¹ à des fins de diagnostic ou de thérapie. Les utilisations diagnostiques se décomposent en techniques *in vivo* fondées sur l'administration à un patient de radioéléments et en techniques *in vitro* pour lesquelles les radioéléments ne sont pas injectés au patient mais utilisés dans des prélèvements du patient.

LE DIAGNOSTIC *IN VIVO*

► LA SCINTIGRAPHIE

La scintigraphie est une technique d'imagerie médicale dite fonctionnelle qui permet d'observer la structure et le fonctionnement d'un organe et ainsi de détecter de nombreuses affections des organes et des processus pathologiques telles qu'une inflammation, une tumeur ou une infection, etc. Elle est complémentaire de l'imagerie dite morphologique comme l'IRM ou le scanner, qui prennent une photo de l'organisme sans donner d'information sur son fonctionnement.

RADIOGRAPHIE ET SCANNER

La radiographie et le scanner utilisent des rayons X, rayonnements électromagnétiques à haute fréquence constitués de photons. Ces rayons X ne sont pas issus des noyaux des atomes contrairement aux rayons gamma et ne sont pas dus à la radioactivité.

Ils sont produits à partir de générateurs électriques. Des électrons sont émis par une cathode constituée d'un filament (généralement en tungstène) chauffée par un courant électrique. Ils sont accélérés entre la cathode et l'anode métallique (généralement en tungstène) par une différence de potentiel.

L'anode est alors bombardée par les électrons, qui émettent des rayonnements X selon les interactions suivantes :

- l'électron est freiné par l'anode et émet un photon ;

- l'électron excite les atomes de l'anode qui émettent des photons pour retourner à leur état fondamental.

Les rayons X ainsi formés traversent le corps humain et sont plus ou moins atténués selon les tissus traversés. Ils atteignent ensuite le film photosensible (radiographie) ou un capteur (scanner) placé derrière le corps et cela produit une image des tissus analysés. Le corps du patient étant traversé par des rayonnements, il reçoit, comme pour les examens scintigraphiques ou lors d'une radiothérapie, une certaine dose qui dépend notamment de l'organe à observer.

Ces techniques sont des imageries dites morphologiques qui parfois sont complémentaires des imageries fonctionnelles comme la scintigraphie.

¹ Les sources radioactives non scellées sont des sources dont la présentation et les conditions normales d'emploi ne permettent pas de prévenir toute dispersion de substance radioactive.

Le principe de la scintigraphie consiste à administrer au patient par voie intraveineuse, par inhalation ou par ingestion en petite quantité, une substance radioactive appelée radio-pharmaceutique qui se fixe sélectivement sur l'organe ou le tissu à explorer. Le radio-pharmaceutique injecté est un émetteur de rayonnements gamma choisi en fonction de l'organe ou de la pathologie à observer. Il peut s'agir d'un radionucléide seul ou fixé sur une molécule ou une cellule (hormone, anticorps). Les radioéléments utilisés ont, le plus souvent, une période très courte et sont évacués rapidement de l'organisme. À titre d'exemple, la période du technétium 99m, très utilisé en scintigraphie, est de

six heures et son élimination urinaire est très rapide. L'activité injectée au patient varie en fonction de l'examen.

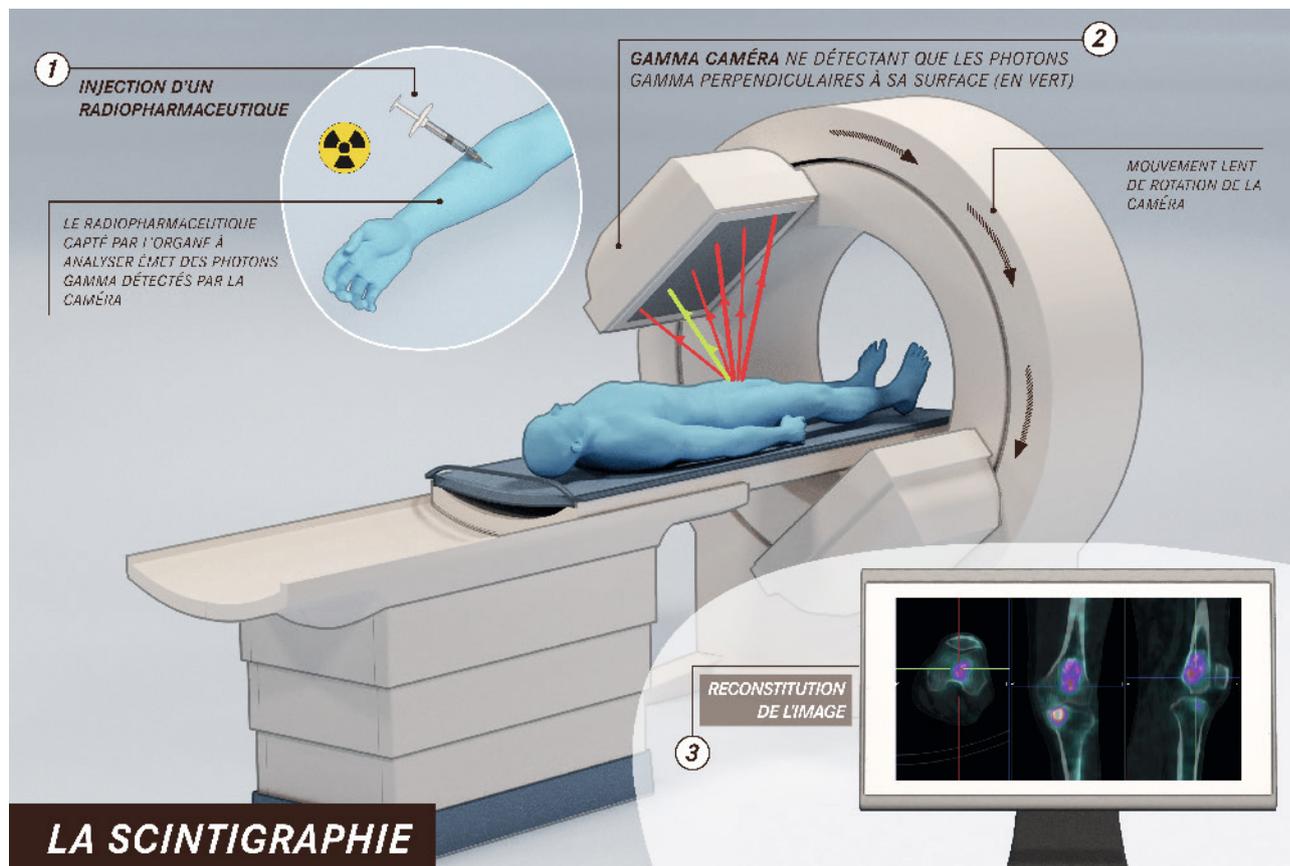
Les rayonnements gamma émis par le radio-pharmaceutique fixé sur l'organe ou le tissu à analyser sont détectés à l'aide d'une caméra spéciale dite gamma-caméra. L'enregistrement d'une succession d'images permet de visualiser le fonctionnement de l'organe ou du tissu analysé. La prise de clichés peut avoir lieu directement après l'injection, après quelques heures ou quelques jours et dure entre 5 et 30 minutes. L'injection d'un radio-pharmaceutique n'a aucun effet sur l'organisme du fait de la faible quantité administrée.

Principe de la gamma-caméra

La gamma-caméra est constituée d'un collimateur, épaisse plaque de plomb ou de tungstène percée de canaux fins parallèles, d'un cristal et d'un photomultiplicateur, sous forme de tube électronique qui détecte les signaux lumineux.

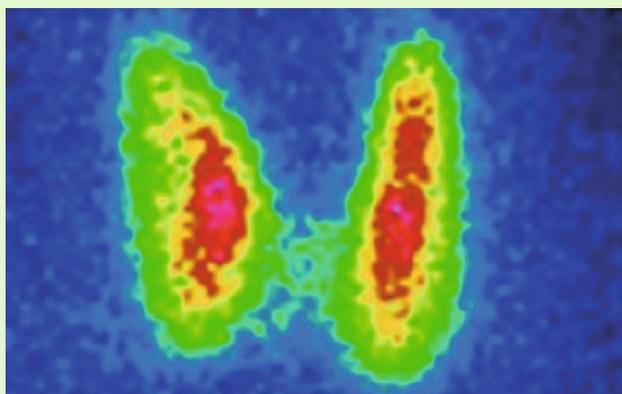
Le collimateur sélectionne les photons gamma émis par le radio-pharmaceutique dont la direction est perpendiculaire à la surface du cristal. Le cristal en iodure de sodium dopé au thallium arrête les photons gamma et convertit une partie de l'énergie déposée en scintillation lumineuse détectée par les photomultiplicateurs qui convertissent le signal lumineux en signal électrique.

L'énergie et la position du rayon gamma ayant interagi dans le cristal sont alors déterminées.



EXEMPLES D'EXAMENS SCINTIGRAPHIQUES

La scintigraphie de la thyroïde permet d'observer le métabolisme de l'iode dans la glande thyroïde. De l'iode 123 ou du technétium 99m sont injectés au patient et vont se fixer sélectivement sur la thyroïde. La scintigraphie permet ainsi de visualiser les régions de la thyroïde qui captent le moins de radio-pharmaceutiques (nodules froids) ou qui captent le plus de radio-pharmaceutiques.



Scintigraphie de la thyroïde

La scintigraphie pulmonaire permet d'étudier le fonctionnement des poumons : la ventilation des poumons (circulation de l'air) et la perfusion (circulation du sang). La scintigraphie de ventilation consiste à administrer par inhalation un aérosol contenant une quantité connue de produit radioactif (xénon 133, krypton 81m, technétium 99m) au patient. Les images réalisées à l'aide de la gamma-caméra permettent de mettre en évidence un défaut de fixation du radio-pharmaceutique inhalé qui se traduit par une zone pulmonaire qui ne reçoit pas d'air. La scintigraphie de perfusion consiste à injecter par voie intraveineuse le radio-pharmaceutique qui se diffuse dans l'organisme. Lorsque le poumon est normalement perfusé, les radio-pharmaceutiques se répartissent de façon homogène dans les deux poumons. Lorsqu'une artère est obstruée par un caillot, les particules n'y pénètrent pas et ne sont pas détectées par la gamma-caméra : c'est le cas de l'embolie pulmonaire.

► LA TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITONS (TEP)

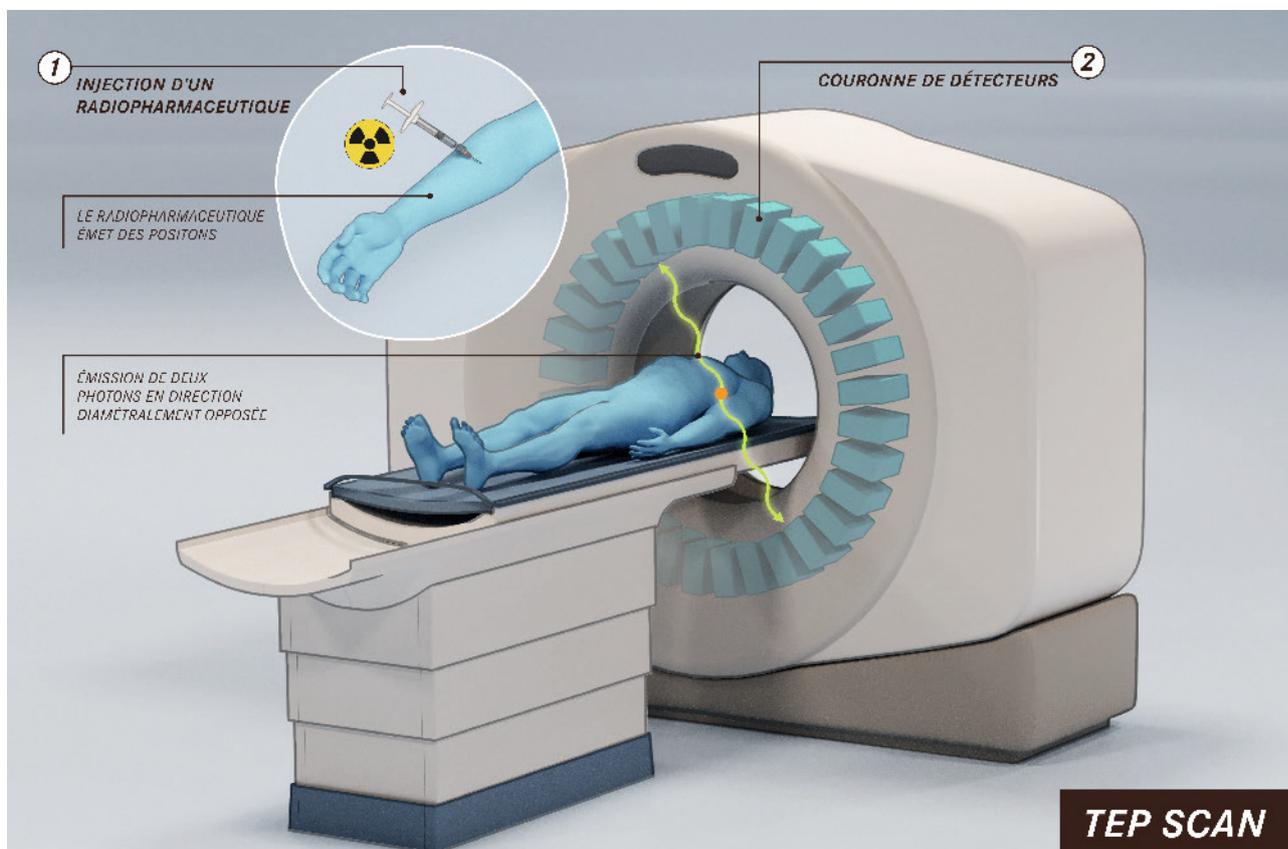
La tomographie par émission de positons (TEP) est une scintigraphie utilisant des radioéléments émetteurs de positons tels que le fluor 18, le brome 76 ou l'oxygène 15. Contrairement aux radioéléments émetteurs de photons utilisés en scintigraphie classique, les émetteurs de positons sont légers, abondants et plus faciles d'utilisation. Après un court parcours dans le corps, les positons disparaissent en émettant deux rayons gamma émis dos à dos. La détection simultanée des deux rayons gamma permet de localiser la zone d'émission et de dresser une carte de la fixation des atomes radioactifs dans les cellules. La TEP nécessite une caméra à scintillation adaptée. Cette technique d'imagerie permet le dépistage précoce des cancers, le suivi du traitement ou la surveillance des cancers. Elle est également utilisée pour diagnostiquer des maladies cérébrales dégénératives comme la maladie d'Alzheimer, des pathologies inflammatoires ou infectieuses.

Pour diagnostiquer les cancers, le radio-pharmaceutique majoritairement utilisé est le fluor 18 sous forme de sucre comparable au glucose, le 18F-FDG (Fluorodesoxyglucose au fluor 18). Il est injecté au patient par voie intraveineuse, et

va se fixer sur les cellules cancéreuses. En effet, les cellules cancéreuses se multiplient sans cesse, elles ont besoin de beaucoup d'énergie et donc de beaucoup de glucose. Elles vont donc consommer une quantité anormalement élevée de glucose par rapport aux cellules saines. Le radio-pharmaceutique se fixe en grande quantité sur les cellules cancéreuses qui peuvent alors être détectées avec la caméra TEP.



TEP scan



LE DIAGNOSTIC *IN VITRO* : LA RADIO-IMMUNOLOGIE

La radio-immunologie est une technique d'analyse de biologie médicale. Contrairement au diagnostic *in vivo*, le radioélément n'est pas injecté au patient. Cette technique permet de mesurer la quantité de composés (hormones, médicaments, enzymes, etc.) dans les fluides biologiques préalablement prélevés sur le patient (le sang, l'urine, la salive, etc.). Toutefois, aujourd'hui, la radio-immunologie est fortement concurrencée par les techniques d'analyse ne faisant pas appel à des radionucléides, plus simples à mettre en œuvre.

La radio-immunologie est une technique de dosage qui se base généralement sur les réactions immunologiques (réactions spécifiques anticorps-antigène). Pour déterminer la quantité

d'antigènes dans l'échantillon prélevé sur le patient, une quantité connue d'antigènes marqués avec un radionucléide et une faible quantité d'anticorps spécifiques sont ajoutés au milieu. L'antigène marqué permet de déterminer la quantité d'antigène dans l'échantillon.

Les antigènes, qu'ils soient marqués ou non, se fixent sur les anticorps. Étant donné qu'ils se trouvent en excès dans l'échantillon par rapport aux anticorps, une partie des antigènes sera fixée sur les anticorps et l'autre restera libre.

Les antigènes libres sont séparés des antigènes fixés et les quantités d'antigènes marqués libres et liés sont mesurées et permettent de déterminer la quantité d'antigènes non marqués présente dans l'échantillon prélevé au patient.

LA PRODUCTION DE RADIOISOTOPES

Les radioisotopes sont des atomes dont le noyau est instable. Cette instabilité est due à un excès de protons et/ou de neutrons. Ils se stabilisent en libérant de l'énergie sous forme de rayonnements.

90 % des radioisotopes sont utilisés à des fins diagnostiques et 10 % pour des thérapies. Les radioéléments utilisés en médecine sont produits avec des accélérateurs de particules (cyclotron et accélérateur linéaire) ou par des réacteurs nucléaires.

Le technétium ^{99m}Tc , utilisé dans 75 % des examens scintigraphiques, est obtenu par désintégration β du molybdène ^{99}Mo , lui-même produit par irradiation dans un réacteur nucléaire d'uranium enrichi à près de 20 %. Après irradiation, le molybdène est extrait du réacteur puis mis en générateur qui permet l'extraction du ^{99m}Tc . Du fait de sa période radioactive plus élevée (66 heures pour ^{99}Mo , contre six heures pour ^{99m}Tc), le molybdène peut être stocké plus longtemps que le technétium. Les générateurs sont distribués dans les hôpitaux une à deux fois par semaine. Le technétium peut alors être extrait de ce générateur et mélangé avec des molécules injectables. Le ^{99}Mo de fission est produit essentiellement par six réacteurs de recherche dans le monde.

Certains radioisotopes sont produits dans des accélérateurs de particules appelés cyclotrons. Ils sont composés de deux demi-cylindres métalliques se faisant face, séparés par un espace, le tout dans un vide poussé. Un champ magnétique perpendiculaire au plan des demi-cylindres est appliqué ainsi qu'un champ électrique dans l'espace qui sépare les demi-cylindres. Une source, placée au voisinage du centre du cyclotron, émet des particules chargées. Ces particules sont soumises au champ magnétique qui courbe leur trajectoire et au champ électrique qui les accélère. Les particules ont ainsi une trajectoire accélérée en forme de spirale jusqu'à être expulsées du cyclotron pour être propulsées sur leur cible.

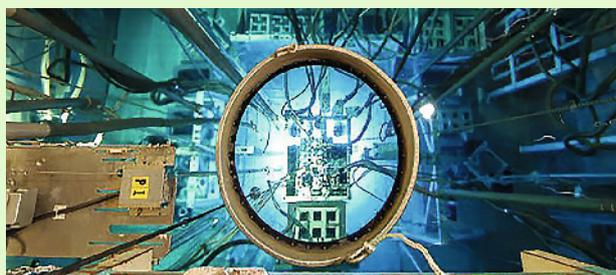
À titre d'exemple, la source utilisée en protonthérapie est un système qui ionise un gaz d'hydrogène en le chauffant. Le noyau d'hydrogène étant constitué d'un seul proton, celui-ci est séparé

de son électron par un champ électrique, puis le proton est extrait pour être accéléré dans le cyclotron avant d'être orienté vers la tumeur du patient.

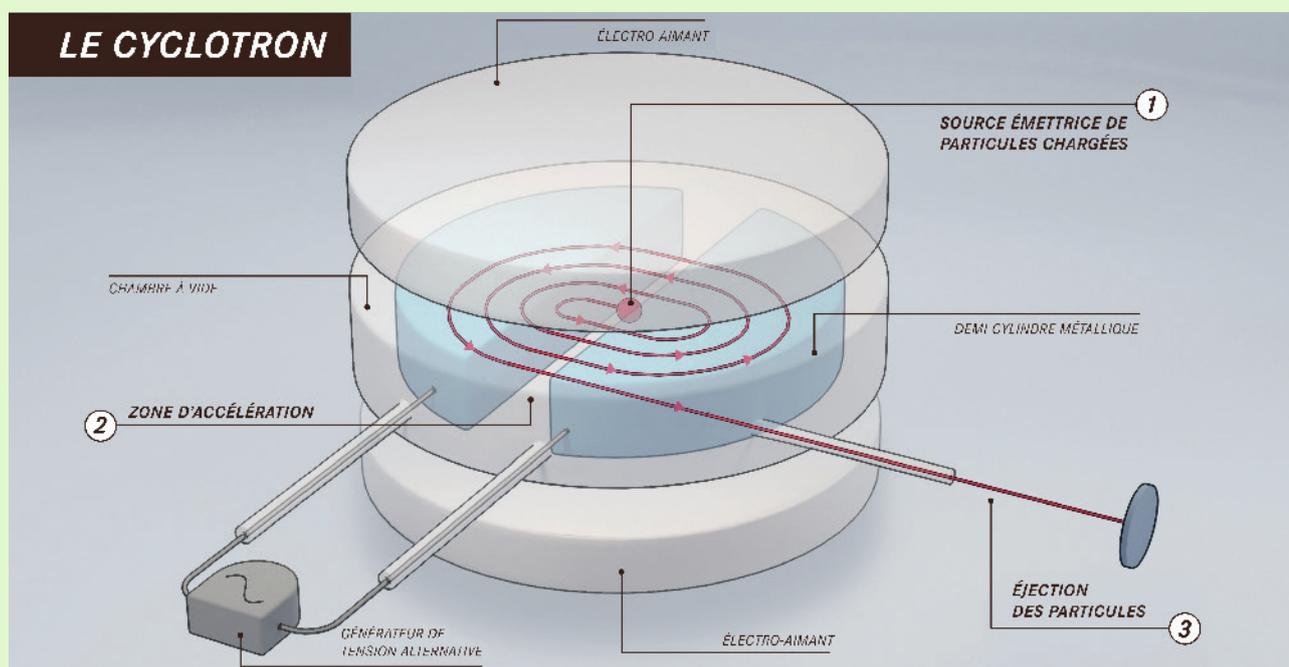
Le fluor 18 utilisé par la tomographie à émission de positon est produit dans un cyclotron par bombardement des noyaux d'oxygène 18 avec des protons accélérés dans le cyclotron. Une réaction nucléaire a lieu et transforme les noyaux d'oxygène en fluor 18. Du fait de la faible période du fluor 18 (110 minutes), celui-ci doit être produit à proximité de l'hôpital.

Il existe un autre type d'accélérateur de particules utilisé pour la fabrication de radioisotopes : l'accélérateur linéaire des particules. Il est constitué d'un alignement de tubes conducteurs séparés par des espaces dans lesquels un champ électrique alternatif est appliqué. Les particules sont accélérées dans cet espace.

En médecine nucléaire, les radioisotopes formés peuvent être liés à des molécules pour former des radio-pharmaceutiques. Leur préparation s'effectue dans une pièce isolée appelée laboratoire « chaud », équipée de poubelles plombées, de réfrigérateurs plombés, de boîtes à gants dans lesquelles sont préparés les radio-pharmaceutiques. Les seringues sont mises dans des protections blindées pour protéger les travailleurs. Le produit radioactif est injecté au patient dans une salle d'injection adjacente au laboratoire chaud.



Réacteur expérimental Osiris



STÉRILISATION DU MATÉRIEL PAR RAYONNEMENTS

Les rayonnements sont également utilisés dans le secteur médical pour stériliser le matériel utilisé dans les blocs opératoires et pour les soins : seringues, aiguilles, gants chirurgicaux, compresses, implants, poches pour solution intraveineuse, etc. Les rayonnements provoquent des lésions dans les molécules d'ADN et entraînent ainsi la destruction de divers organismes (champignons, insectes, parasites, moisissures, microbes et bactéries). La stérilisation est effectuée dans une usine de stérilisation avec généralement des sources de cobalt 60 ou césium 137, émetteurs gamma de haute énergie et dure quelques secondes. Ce mode de stérilisation est idéal pour stériliser les matériaux sensibles à la chaleur. Ainsi, le matériel peut être directement stérilisé dans son emballage.

Avant une transfusion sanguine, les poches de sang sont irradiées dans les hôpitaux dans des irradiateurs afin d'éliminer les cellules susceptibles d'engendrer la mort du patient.

Que ce soit pour la stérilisation du matériel médical ou le traitement des poches de sang, les rayonnements n'ont aucun effet sur le produit en lui-même.



Irradiateur sanguin

LA RADIOTHÉRAPIE MÉTABOLIQUE

La radiothérapie métabolique est une technique de radiothérapie mise en œuvre en médecine nucléaire (utilisation de sources non scellées) lors de laquelle les radionucléides sont directement injectés aux patients. Elle consiste à irradier localement par un radio-pharmaceutique les tumeurs de petites tailles ou disséminées dans l'organisme.

Le radio-pharmaceutique, molécule porteuse d'un atome radioactif émetteur bêta moins se fixant sélectivement sur les cellules à traiter, est injecté au patient. C'est donc le même principe que pour la scintigraphie mais avec des quantités beaucoup plus élevées (la dose délivrée est supérieure à 50 Gy). Le radio-pharmaceutique est injecté par voie orale ou intraveineuse. Il se fixe sélectivement sur les cellules à traiter et l'électron bêta émis lors de sa désintégration dépose son énergie par ionisation à l'intérieur de la cellule, ce qui engendre sa destruction. Du fait du parcours limité des émetteurs bêta dans la matière, les rayonnements restent confinés dans les tissus à soigner.

L'iode 131 est utilisé pour le traitement des hyperthyroïdies et des cancers thyroïdiens. La dose administrée est très élevée et induit une hospitalisation dans une chambre dont les murs et les fenêtres sont plombés pour notamment protéger le personnel des rayonnements ionisants. L'iode 131 est capté préférentiellement par la thyroïde et détruit ainsi les cellules thyroïdiennes tout en limitant l'irradiation des cellules avoisinantes.

Aujourd'hui, l'utilisation de radio-pharmaceutiques émetteurs alpha est en plein essor. Ils ont l'avantage, par rapport aux émetteurs bêta, de délivrer une grande quantité d'énergie sur un faible parcours et ainsi d'irradier la tumeur tout en limitant l'exposition des cellules saines. À titre d'exemple, le dichlorure de radium 223 (aussi appelé Xofigo®), destiné au traitement des métastases osseuses du cancer de la prostate, se fixe dans l'os en formation (comme le calcium) et y détruit les cellules cancéreuses tout en limitant l'irradiation des tissus sains.

Le contrôle de l'ASN dans le secteur médical

Les activités nucléaires relatives à la fabrication, la détention et l'utilisation de radionucléides et produits ou dispositifs en contenant et à la détention et l'utilisation d'un accélérateur de particules sont soumises à autorisation. Les demandes d'autorisation sont effectuées auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

L'ASN est en charge du contrôle de la radioprotection dans le domaine du médical. Ainsi, elle mène tous les deux ans des inspections dans les centres de radiothérapie (respect des règles relatives à la radioprotection des travailleurs et des patients, l'aménagement des locaux, les équipements et la gestion des sources, assurance de la qualité). L'ASN réalise également des inspections dans les services de médecine nucléaire. Les synthèses des inspections sont consultables sur le site Internet de l'ASN (asn.fr).

Une personne compétente en radioprotection est désignée dans chaque établissement pour assurer la radioprotection des travailleurs qui consiste à : évaluer les risques, diffuser les bonnes pratiques, mettre en place un zonage, former les travailleurs et suivre la dosimétrie.

La radioprotection des patients est également assurée.

EN RADIOTHÉRAPIE

La radiothérapie est une méthode de traitement des cancers utilisant des rayonnements ionisants issus de sources radioactives. Elle est, avec la chirurgie et la chimiothérapie, l'une des techniques majeures employées pour le traitement des cellules cancéreuses.

Il existe plusieurs techniques de radiothérapie selon les rayonnements utilisés et la localisation des sources radioactives. Elles reposent toutes sur un même principe : l'irradiation des cellules cancéreuses entraîne leur destruction et bloque leur capacité à se multiplier tout en préservant le mieux possible les tissus sains et les organes avoisinants. Les rayonnements orientés vers les cellules cancéreuses créent des lésions sur ces cellules et induisent des altérations de leur ADN. Ainsi, les cellules ne peuvent plus se multiplier ce qui engendre la mort cellulaire.

Les différentes techniques de radiothérapie sont décrites ci-après.

LA RADIOTHÉRAPIE EXTERNE

La radiothérapie externe consiste à irradier les cellules cancéreuses avec des rayonnements émis par une source située à distance du patient qui traversent la peau pour atteindre la tumeur. En radiothérapie externe, les rayonnements utilisés sont les photons de haute énergie (ou rayons X) et les électrons produits par des accélérateurs de particules. Les protons peuvent également être utilisés, il s'agit alors de protonthérapie.

La radiothérapie externe est utilisée pour traiter un grand nombre de cancers tels que les cancers du sein, du poumon, du sang, etc.

Il existe plusieurs techniques de radiothérapie externe, détaillées ci-après, qui se modernisent sans cesse pour améliorer les traitements et diminuer les effets secondaires dus essentiellement à l'irradiation des cellules saines à proximité des cellules cancéreuses :

- la plus utilisée de nos jours est la **radiothérapie conformationnelle 3D** qui fait correspondre le plus précisément possible le volume sur lequel sont dirigés les rayons au volume de la tumeur, en épargnant au maximum les tissus sains avoisinants ;
- la **radiothérapie conformationnelle par Modulation d'intensité** repose sur le même principe que la radiothérapie conformationnelle 3D mais en modulant le débit de dose délivré ;
- la **radiothérapie asservie à respiration** prend en compte les mouvements du patient et donc de ses organes dus à la respiration. Cette technique de radiothérapie asservit les rayonnements aux mouvements des organes et améliore ainsi la précision des traitements ;
- la **radiothérapie stéréotaxique** est une technique de haute précision qui utilise des microfaisceaux de photons ou de protons ce qui permet d'irradier à hautes doses de petits volumes. Elle est notamment utilisée pour traiter les tumeurs cérébrales ;
- la **tomothérapie** réalise des irradiations adaptées à la tumeur en épargnant au mieux les organes avoisinants. L'accélérateur de particules tourne autour du patient pendant que le patient se déplace longitudinalement ;



Appareil de tomothérapie

- la **cyberknife** est une technique où de nombreux faisceaux convergent avec une grande précision vers la tumeur en minimisant ainsi l'impact sur les tissus sains.



Appareil cyberknife

Ces deux dernières techniques sont destinées à traiter des tumeurs dont la localisation ne permet pas la réalisation d'une radiothérapie plus classique de type conformationnelle.

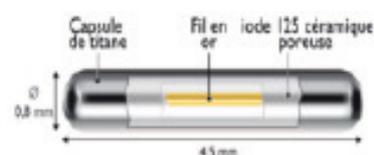
LA CURIETHÉRAPIE

La curiethérapie est une technique d'irradiation consistant à introduire les sources radioactives directement au contact ou à l'intérieur de la tumeur.

Il existe trois types de curiethérapie :

- **la curiethérapie à bas débit** : elle nécessite l'hospitalisation du patient pendant plusieurs jours. Elle délivre des débits de dose allant de 0,4 à 2 Gy/h. Les sources d'iridium 192 se présentent sous forme de fils (de 0,3 à 0,5 mm de diamètre et 14 cm de longueur maximale). Elles sont mises en place sur le patient

dans une chambre protégée et laissées pendant le temps de l'hospitalisation. La curiethérapie en bas débit peut être utilisée pour traiter les cancers de l'œil, ORL, du sein ou gynécologiques. Elle est également utilisée pour le traitement des cancers de la prostate : des sources scellées d'iode 125 de quelques millimètres de long sont implantées de façon permanente dans la prostate du patient en raison de la décroissance rapide de leur radioactivité. Les sources radioactives émettent des rayons qui détruisent les cellules cancéreuses ;



Grains d'iodes 125 pour la curiethérapie de la prostate



Radiographie de la prostate avec visualisation des grains d'iode 125

- **la curiethérapie pulsée à moyen débit** : elle délivre des doses identiques à la curiethérapie à bas débit mais sur des temps plus courts avec une source d'iridium de petite dimension. Contrairement à la curiethérapie à bas débit, le patient ne porte pas en permanence des sources. Cette technique est amenée à remplacer la curiethérapie à bas débit car elle renforce la radioprotection des personnels qui peuvent intervenir sans être exposés, mais également le confort du patient. Elle peut être utilisée pour traiter les cancers ORL, du sein ou gynécologiques ;

- **la curiethérapie à haut débit** : le débit de dose est élevé, de l'ordre de 12 Gy/h et le temps de traitement très court. La source utilisée est une source d'iridium de petite dimension. Elle est essentiellement utilisée pour traiter les cancers de l'œsophage, des bronches, du sein, etc.

Les radionucléides utilisés en curiethérapie sont différents de ceux utilisés en médecine nucléaire. Ils possèdent une énergie plus élevée et sont émetteurs de rayonnements bêta et gamma. Les doses administrées aux patients sont plus élevées et varient selon le type de cancer, le stade du cancer, l'organe à traiter, l'âge du patient, etc.

LA PROTONTHÉRAPIE

Cette technique consiste à traiter les tumeurs avec des protons accélérés contrairement à la radiothérapie conventionnelle qui utilise exclusivement des faisceaux de photons ou d'électrons. C'est une technique précise qui épargne les tissus sains, c'est pourquoi elle est utilisée pour des tumeurs situées à proximité d'organes critiques et sensibles aux radiations tels que l'œil ou le cerveau, elle est également utilisée en pédiatrie.

Le principe de la protonthérapie consiste à diriger le faisceau de protons accélérés issu de l'accélérateur de particules vers la tumeur du patient. L'énergie des protons est réglée pour atteindre la tumeur et libérer le maximum de leur énergie sur la tumeur. Au-delà de celle-ci, les tissus ne sont pas atteints.

Cette technique est très coûteuse car elle nécessite des technologies lourdes et sophistiquées. En France, il existe aujourd'hui seulement deux installations de protonthérapie.



Protonthérapie

LES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR MÉDICAL

LEUR NATURE

Les déchets radioactifs du secteur médical produits suite aux analyses *in vitro*, *in vivo* ou aux radiothérapies peuvent être des effluents liquides ou gazeux ou des déchets solides ou liquides contaminés.

Les effluents liquides radioactifs proviennent essentiellement :

- du rinçage dans des éviers réservés aux effluents radioactifs, dits « éviers chauds », des instruments non jetables utilisés par exemple pour les préparations et les injections (protège-seringue, plateaux, etc.) ;

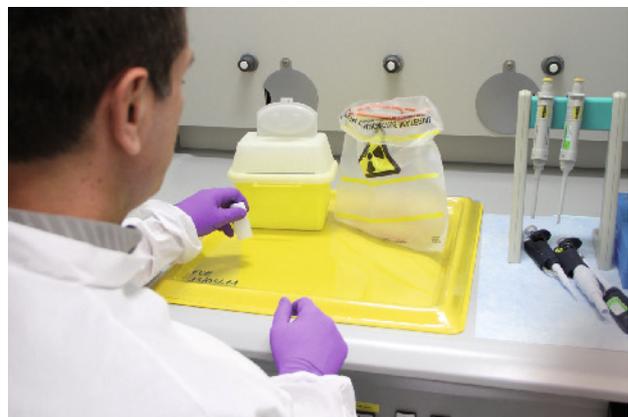


Protège-seringue

- des sanitaires des patients ayant reçu des injections de radionucléides (scintigraphie, TEP) ou des sanitaires des chambres protégées dans le cas des traitements à l'iode 131.

Les effluents gazeux radioactifs proviennent des radionucléides potentiellement volatilisés lors des phases de préparation et de manipulation des sources non scellées ou des examens de ventilation pulmonaire.

Les déchets contaminés sont de deux types : les déchets piquants ou coupants (lames, aiguilles, etc.) et les autres (gants, compresses, cotons, tubulures, tubes réactifs, embouts de pipette, etc.). La particularité de ces déchets est, qu'outre le risque radioactif, ils peuvent présenter d'autres risques : le risque infectieux, le risque chimique ou toxique.



Utilisation de produits radioactifs dans le secteur médical

Les autres déchets : certains déchets peuvent être induits. Il s'agit par exemple des pots en plomb transportant les radiopharmaceutiques qui, après contrôle de non-contamination, sont évacués vers une filière spécifique.

Les déchets du médical dans l'Inventaire national

Les établissements qui utilisent des radionucléides à des fins de diagnostic ou de thérapie dans le domaine de la médecine sont tenus de transmettre chaque année à l'Andra un inventaire des déchets radioactifs qu'ils détiennent au 31 décembre de l'année écoulée, en indiquant la filière de gestion utilisée. À fin 2016, le volume de déchets produits par les activités médicales est de l'ordre de 10 500 m³ parmi lesquels 1 950 m³ sont gérés en décroissance et 8 400 m³ sont stockés au Centre de stockage de la Manche (CSM).

LEUR GESTION

La gestion des déchets issus du secteur médical est encadrée par la loi. L'arrêté du 23 juillet 2008 a homologué la décision n° 2008-DC-0095 de l'ASN, prise en application des dispositions de l'article R.1333-12 du Code de la santé publique, qui « fixe les règles techniques auxquelles doit satisfaire l'élimination des effluents et des déchets contaminés par des radionucléides, ou susceptibles de l'être du fait d'une activité nucléaire. »

Dans les établissements de soins, un « zonage déchets » est mis en place afin de distinguer les zones où les déchets et effluents produits sont contaminés ou susceptibles de l'être, des zones où les déchets ou effluents produits sont conventionnels. Il peut s'agir d'une simple paillasse (évier chaud par exemple), d'une partie d'un local ou de sa totalité.

Les modalités de gestion des déchets et des effluents contaminés sont décrites pour chaque établissement dans un document, le plan de gestion des déchets et des effluents contaminés.

Ce plan comprend :

- les modes de production et de gestion des effluents et déchets radioactifs (modalités de tri, de conditionnement, de stockage) ;
- les dispositions assurant l'élimination des déchets et des effluents et les modalités de contrôles associés ;
- l'identification des zones où sont produits et entreposés les effluents et les déchets ;
- l'identification et la localisation des points de rejets des effluents ;
- la surveillance du réseau récupérant les effluents et de l'environnement.

Les déchets contaminés et les effluents radioactifs sont gérés indépendamment.

ARTICLE R. 1333-16 DU CODE DE LA SANTÉ PUBLIQUE

« Les effluents et déchets contaminés par des radionucléides ou susceptibles de l'être ou activés du fait d'une activité nucléaire sont collectés et gérés en tenant compte des caractéristiques et des quantités de ces radionucléides, du risque d'exposition encouru ainsi que des exutoires retenus. Les modalités de

collecte, de gestion et d'élimination des effluents et déchets sont consignées par le responsable d'une activité nucléaire dans un plan de gestion des effluents et des déchets tenu à la disposition de l'autorité compétente ».

LA GESTION DES DÉCHETS CONTAMINÉS

Les déchets contaminés par des radionucléides présentent un risque d'exposition et de contamination pour le personnel, les patients et l'environnement. Il convient donc de les éliminer dans des filières dédiées en assurant la maîtrise des risques d'exposition et de contamination.

Les établissements de soins qui possèdent ou produisent des déchets contaminés en sont responsables jusqu'à leur élimination définitive. L'élimination des déchets comporte des opérations de tri, de conditionnement, de caractérisation, d'entreposage, de collecte, de transport et de traitement éventuel.



Poubelles de tri utilisées dans les hôpitaux

Les déchets contaminés sont séparés des déchets non contaminés puis triés en fonction de leur nature, des radionucléides qu'ils contiennent, et des risques spécifiques (infectieux, cancérigène, reprotoxique, etc.). Ils sont conditionnés dans des emballages adaptés qui protègent du risque radiologique (poubelle en plomb) et également des autres risques (infectieux, chimique ou toxique). Ainsi, les poubelles en plomb peuvent contenir un emballage DASRI (déchets d'activités de soins à risques infectieux et assimilés)¹. Les déchets contaminés sont gérés selon la période radioactive des radionucléides qu'ils contiennent.

Les déchets contaminés peuvent être gérés en décroissance :

- s'ils contiennent ou sont contaminés par des radionucléides de période radioactive inférieure à 100 jours ;
- si les produits de filiation de ces radionucléides, issus des désintégrations successives des radionucléides, ne sont pas eux-mêmes des radionucléides de période supérieure à 100 jours. Dans le cas où les produits de filiation seraient des radionucléides de période supérieure à 100 jours, les déchets peuvent être gérés par décroissance radioactive si le rapport de la période du radionucléide père sur celle du radionucléide descendant est inférieur au coefficient 10^{-7} .



Emballages DASRI

La plupart des radionucléides utilisés pour des applications *in vivo* ont une période inférieure à 100 jours : ^{99m}Tc , ^{123}I , ^{131}I , ^{18}F .

Les déchets sont entreposés dans un lieu fermé et réservé à ce type de déchets. Après une durée d'entreposage au moins 10 fois supérieure à la période du radionucléide ayant la période la plus élevée, les déchets peuvent être éliminés comme des déchets non radioactifs après contrôle d'absence de contamination. Ainsi, après décroissance, les déchets sont dirigés :

- en l'absence de risques infectieux et chimiques, vers les filières des déchets non dangereux ;
- en présence d'un risque infectieux, vers la filière des déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI) ;
- en présence de risques chimiques ou toxiques, vers la filière adaptée des déchets à risques chimiques ou toxiques.

Afin de s'assurer de l'absence de contamination des déchets destinés à des filières de gestion de déchets non radioactifs, des systèmes de détection (balises, portiques) sont mis en place dans les établissements disposant d'une installation de médecine nucléaire.



Local d'entreposage des déchets radioactifs

Les générateurs produisant le technétium utilisés en médecine nucléaire et livrés régulièrement dans les établissements de soins, peuvent être utilisés pendant une durée limitée. Du fait de la décroissance radioactive, au bout d'environ une semaine, le générateur ne produit plus assez de technétium. Il est alors mis en décroissance pendant 3 semaines. Puis lorsque le niveau de radioactivité est assez faible, il est retourné au fournisseur.

Les déchets ne pouvant être gérés par décroissance, dont la période radioactive est supérieure à 100 jours, sont gérés dans les filières autorisées pour la gestion des déchets radioactifs. Ils sont dirigés vers les centres de stockage de l'Andra.



Conteneur de transport de générateur de technétium



Générateur de technétium

¹ Les DASRI contiennent des microorganismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou dont on a de bonnes raisons de croire qu'en raison de leur nature, de leur quantité ou de leur métabolisme, ils causent une maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants. Même en l'absence de risque infectieux, sont également considérés comme DASRI : les matériels et matériaux piquants ou coupants et les produits sanguins.

LA GESTION DES EFFLUENTS LIQUIDES RADIOACTIFS

Les effluents liquides peuvent être gérés par décroissance radioactive s'ils répondent aux mêmes critères que ceux énoncés pour les déchets contaminés.

Les effluents liquides sont dirigés et entreposés dans des cuves avant leur rejet pour éviter un rejet direct dans le réseau d'assainissement. Au moins deux cuves récoltent les effluents : lorsqu'une est en phase de remplissage, l'autre est en phase d'entreposage de décroissance. Les effluents liquides contenus dans les cuves d'entreposage sont rejetés dans le réseau d'assainissement si l'activité est inférieure à 10 Bq/L, excepté pour les chambres de patients traités à l'iode 131 où la limite est de 100 Bq/L. À noter que la dilution volontaire des effluents liquides radioactifs avant rejet est strictement interdite.



Cuves de décroissance

Après décroissance d'une durée équivalente à au moins 10 fois la période du radionucléide ayant la période la plus élevée et après contrôle, les effluents peuvent être rejetés dans l'environnement. Toutefois, il convient de noter que « tout déversement d'eaux usées autres que domestiques dans le réseau public doit être préalablement autorisé par le gestionnaire de réseau. »

Le rejet d'effluents liquides contenant des radionucléides de période supérieure à 100 jours est soumis à l'approbation de l'ASN. L'établissement doit réaliser une étude technico-économique, une étude d'incidence présentant les effets des rejets sur la population, l'environnement et les travailleurs et doit définir les modalités mises en place pour contrôler les rejets et les suspendre si besoin. Sur la base de ces éléments, l'ASN peut, soit autoriser le rejet des effluents en fixant des conditions de rejet dans l'environnement, soit imposer leur évacuation vers les centres de stockage de l'Andra si l'impact sur l'environnement, la population ou les travailleurs est trop important.

LA GESTION DES EFFLUENTS GAZEUX RADIOACTIFS

Le rejet des effluents gazeux doit être aussi faible que raisonnablement possible. Des filtres, tels que des filtres à charbon actifs sont mis en place. Ces filtres sont éliminés avec les déchets contaminés. Lorsque les effluents gazeux contiennent un radionucléide de période supérieure à 100 jours, l'ASN fixe les conditions de rejets dans l'environnement (suivi de l'activité rejetée, plan de surveillance, etc.) comme pour les effluents liquides radioactifs.

LE CAS PARTICULIER DES ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES DE PARTICULES

Le démantèlement des accélérateurs linéaires de particules induit également des déchets. En effet, certaines pièces de l'accélérateur peuvent être activées sous le flux de particules. Ces pièces doivent être identifiées, caractérisées et leur activité évaluée en vue de définir leur filière de gestion et leur prise en charge éventuelle par l'Andra. Toutefois, la caractérisation des émetteurs bêta purs à vie longue étant difficile et coûteuse, les déchets sont généralement entreposés *in situ* en attente de caractérisation. Des études sont en cours pour aider à la caractérisation de ces pièces métalliques.

LES PACEMAKERS AU PLUTONIUM 238

Les premiers stimulateurs cardiaques fonctionnaient avec une pile dont la durée de vie était limitée, et qui nécessitait un changement régulier (tous les 10 ans environ). Pour pallier ce défaut, des stimulateurs cardiaques au plutonium 238 ont été mis au point dans les années 1970. Leur durée de vie étant beaucoup plus élevée que les pacemakers de l'époque (environ 40 ans), ils peuvent donc fonctionner jusqu'au décès du patient. Ces stimulateurs utilisent l'énergie thermique de la désintégration alpha du plutonium, transformée en électricité qui alimente le stimulateur. Le plutonium 238 est enfermé dans un boîtier à plusieurs couches métalliques afin de protéger le patient des rayonnements. Les pacemakers au plutonium 238 ont été abandonnés au profit des pacemakers à pile iode/lithium du fait du risque d'irradiation en cas de défaillance du boîtier hermétique. Aujourd'hui ces pacemakers fonctionnent encore chez certains patients. Au décès du patient, il est retiré et renvoyé au fournisseur car considéré comme une source scellée.



Pacemaker au plutonium

DOSSIER

06

Les sources scellées

PRÉSENTATION DES SOURCES SCELLÉES	135
Définition	135
Gestion des sources scellées par l'IRSN	135
Place des sources scellées dans l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs	135
DOMAINES D'UTILISATION DES SOURCES SCELLÉES	137
Usage industriel	137
Usage médical	138
GESTION DES SOURCES SCELLÉES USAGÉES	139
Obligation de reprise	140
Recyclage des sources scellées	140
Prise en charge par l'Andra	140

PRÉSENTATION DES SOURCES SCÉLÉES

DÉFINITION

Une source scellée désigne une source constituée de substances radioactives solidement incorporées dans des matières solides inactives ou scellées dans une enveloppe inactive présentant une résistance suffisante pour éviter, dans des conditions normales d'emploi, toute dispersion de substances radioactives.

GESTION DES SOURCES SCÉLÉES PAR L'IRSN

Les sources scellées concentrent de la radioactivité et peuvent représenter un danger en cas de contact prolongé ou d'ingestion.

Afin d'assurer la sécurité des utilisateurs, du public et de l'environnement, la réglementation impose le contrôle des conditions de détention, d'utilisation et de cession des sources de leur fabrication à leur mise en déchet ou recyclage.

En France, la surveillance du respect de cette réglementation est assurée par l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - irsn.fr).

Les demandes relatives à la détention et l'utilisation de rayonnements ionisants sont instruites et délivrées par les différentes autorités

compétentes en matière de sources radioactives (ASN, préfectures, DSND, etc.). L'instruction des demandes d'autorisation concernant la fabrication et la distribution de sources est centralisée au niveau national. L'IRSN centralise ces autorisations ainsi que les mouvements de sources sur le territoire français (acquisition, cession, exportation, importation, reprise, remplacement, etc.). À partir de ces données informatisées, l'IRSN constitue l'Inventaire national des sources de rayonnements ionisants.

L'IRSN est donc le correspondant pour ce qui concerne les modalités pratiques pour tous mouvements de sources : obtention de formulaires pour l'achat de sources, reprise de sources, inventaire annuel, etc.

PLACE DES SOURCES SCÉLÉES DANS L'INVENTAIRE NATIONAL DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

Toutes les sources scellées présentes sur le territoire français ne sont pas recensées dans l'Inventaire national. Seules les sources périmées (*voir paragraphe 3*) ou dont le détenteur n'a plus l'usage sont considérées comme des déchets et sont à ce titre inventoriées par l'Andra.

LES SOURCES SCÉLÉES DANS L'INVENTAIRE NATIONAL

Les sources scellées usagées font l'objet de plusieurs familles dans l'Inventaire national :

- les colis « blocs sources » du CEA (famille MA-VL F2-9-01), qui regroupent des colis constitués à partir de sources scellées usagées (solides, liquides ou gazeuses), collectées auprès des petits producteurs de déchets (hôpitaux, industries agroalimentaires, papeteries, industries pétrochimiques, etc.) ;
- les colis de sources radioactives scellées, de période inférieure ou égale au cobalt 60 du CEA (famille FMA-VC F3-9-02). Ces sources ont été utilisées dans le passé à des fins médicales, de recherche ou industrielles ;
- les sources scellées usagées (famille S01). La majorité de ces

sources correspond à des sources de détecteurs ioniques de fumée. Parmi ces sources, on trouve aussi des crayons sources primaires et secondaires des réacteurs à eau pressurisée d'EDF. Le reste correspond aux sources scellées sans emploi récupérées et entreposées par les principaux fournisseurs ou fabricants de sources ;

- les objets radioluminescents (famille S02). Cette famille concerne essentiellement le matériel réformé des armées regroupant des objets radioluminescents au radium et au tritium (boussoles, cadrans, dispositifs de visée, etc.) ;
- les sources scellées usagées contaminées (famille S03) et les parasurtenseurs radioactifs (famille S04).

Pour des raisons historiques, les sources ayant bénéficié, par le passé, d'un régime de dispense particulier ne sont pas inventoriées par l'IRSN mais par l'Andra car elles sont hors d'usage et considérées comme des déchets. Il s'agit :

- des paratonnerres radioactifs ;
- des détecteurs ioniques d'incendie (les détecteurs actuels ne contiennent pas de source radioactive) ;
- des sources radioluminescentes ;

- des parasurtenseurs (anciens composants électroniques notamment utilisés pour la protection électrique du réseau téléphonique).

Tous ces objets ont pu être fabriqués avec du radium, radionucléide dont l'usage n'a pas été réglementé pendant longtemps ; par la suite, d'autres radionucléides ont pu être utilisés.

DES ANCIENS OBJETS RADIOLUMINESCENTS



Réveils radioluminescents

Lorsque les vieux modèles de montres, réveils, boussoles, cadrans d'avion, systèmes de visée nocturne ont des aiguilles et des cadrans qui restent luminescents après un séjour de deux jours dans l'obscurité complète, ils sont radioactifs et considérés comme étant des sources scellées. Cet effet luminescent était obtenu en ajoutant du radium, puis du tritium, à la peinture. Les quantités de substances radioactives en jeu sont extrêmement faibles et sont confinées dans le boîtier par le verre. Un problème existe si le verre ou le boîtier ne sont plus étanches. Ces vieux modèles sont souvent détenus par des collectionneurs, en particulier des collectionneurs d'objets militaires, par des horlogers ou des héritiers d'horlogers. Ils ne peuvent pas être vendus ou donnés, ils doivent être pris en charge en tant que déchets radioactifs par l'Andra.

DOMAINES D'UTILISATION DES SOURCES SCÉLÉES

Le principe de justification (*voir encadré ci-dessous*) ne permet d'utiliser des radionucléides que s'il n'existe pas d'autre solution.

Les sources scéelées utilisées actuellement que ce soit dans le domaine industriel ou médical respectent ce principe.

Principe de justification (article L. 1333-2 du Code de la santé publique)

Toute activité susceptible de soumettre des personnes à une exposition aux rayonnements ionisants ne peut être entreprise ou exercée que si elle est justifiée par ses avantages, notamment en matière sanitaire, sociale, économique ou scientifique, rapportés aux risques inhérents à cette exposition. Toute activité non justifiée est interdite. Lorsque plusieurs techniques permettent d'obtenir le même résultat, le choix se portera sur celle qui est la moins « dosante » en rayonnements ionisants et dont le bilan, en termes de risques, est le plus favorable.

USAGE INDUSTRIEL

Les propriétés radioactives des sources scéelées sont utilisées dans différents procédés industriels détaillés ci-après.

LA STÉRILISATION PAR IRRADIATION

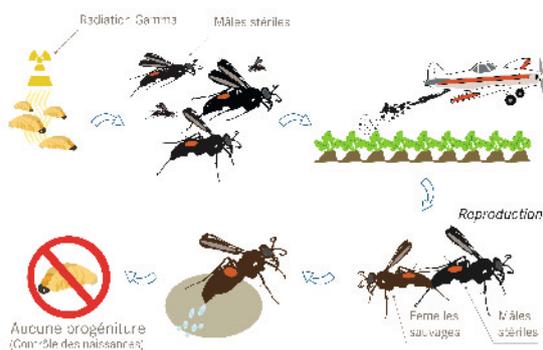
Elle consiste à exposer les éléments à des rayonnements ionisants, ce qui engendre la destruction de tous les organismes sans altérer la composition des matières organiques. Ce procédé est utilisé pour plusieurs applications :

- **le traitement des aliments** : l'irradiation peut prévenir la germination, exterminer les insectes, retarder la maturation (fruits et légumes), prévenir les maladies (volaille) ou réduire la quantité de micro-organismes (herbes aromatiques). À l'issue de leur traitement, ces produits ne présentent aucune radioactivité résiduelle.

Pour ces opérations, plusieurs centrales d'irradiation des aliments existent en France. Elles peuvent utiliser soit une source radioactive scéelée (cobalt 60), soit un accélérateur d'électrons ;

- **l'éradication d'insectes nuisibles** : par exemple les mouches tsé-tsé mâles sont élevées en laboratoire et stérilisées en étant brièvement exposées à des rayons gamma provenant d'une source radioactive scéelée au cobalt 60. Ces mouches stériles sont ensuite mises en liberté dans la zone ciblée afin de se substituer aux mâles locaux auprès des femelles ;

LUTTER CONTRE LES INSECTES NUISIBLES PAR TIS



Lutte contre les insectes nuisibles par la Technique de l'insecte stérile (TIS)

- **la protection de certains éléments du patrimoine** contre les champignons ou pour éliminer tout risque de contamination auprès du public et des chercheurs. La momie de Ramsès II a ainsi été exposée aux rayonnements ionisants ;



Désinfection d'une momie par irradiation (cobalt 60). On aperçoit en arrière-plan les barreaux sources

- **la stérilisation des matériels médicaux**, des produits pharmaceutiques et cosmétiques. Le traitement par rayonnement gamma permet des délais d'exécution rapides des produits déjà sous emballage scéelé.

LES CONTRÔLES ET LES ANALYSES DES MATÉRIAUX

Les sources scéelées sont utilisées dans plusieurs types de dispositifs permettant l'analyse physique ou chimique de matériaux :

- **les contrôles non destructifs par gammagraphie** : ces contrôles sont réalisés sans endommager les objets contrôlés. Il s'agit d'une « radiographie » permettant d'identifier les défauts internes. L'ensemble des techniques et procédés fournissent des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure, sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure ;

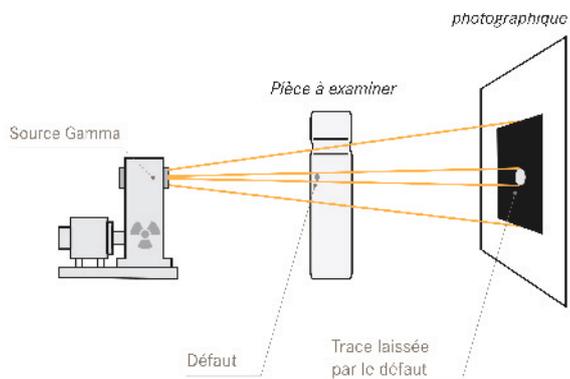


Schéma de principe de contrôle non destructif par gammagraphie

- **les contrôles de présence de plomb** : des appareils portatifs contenant une source scellée sont utilisés pour détecter le plomb présent dans des peintures. Ils sont très employés pour les diagnostics immobiliers. Ces détecteurs utilisent la fluorescence X : lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayonnements (émis par une source de cadmium 109 ou cobalt 57), la matière réémet de l'énergie selon la composition de l'échantillon.

CONTRÔLES DE PARAMÈTRES

Les sources scellées sont utilisées dans différents capteurs industriels :

- pour contrôler le grammage ou l'épaisseur du papier, du tissu, du plastique et du métal. L'atténuation des rayonnements produits par la source radioactive dépend de l'épaisseur des matériaux qu'ils traversent ;
- pour réaliser des contrôles de niveaux des cuves : un faisceau de rayonnement gamma traverse le conteneur en passe de remplissage avant d'être reçu sur un détecteur situé en vis-à-vis. Quand le liquide intercepte en montant le faisceau de rayons gamma, le signal vu par le détecteur chute brusquement. Cette chute permet de déclencher automatiquement l'arrêt du remplissage. Les radionucléides utilisés dépendent des caractéristiques du contenant et du contenu.

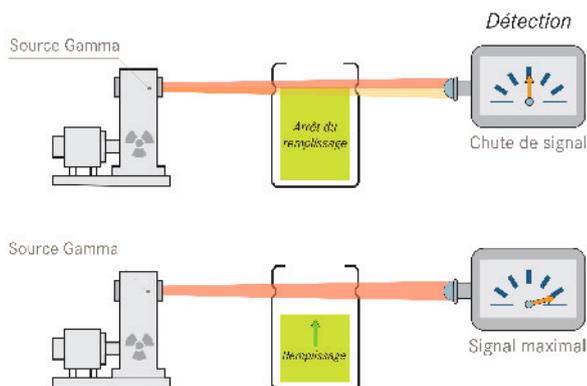
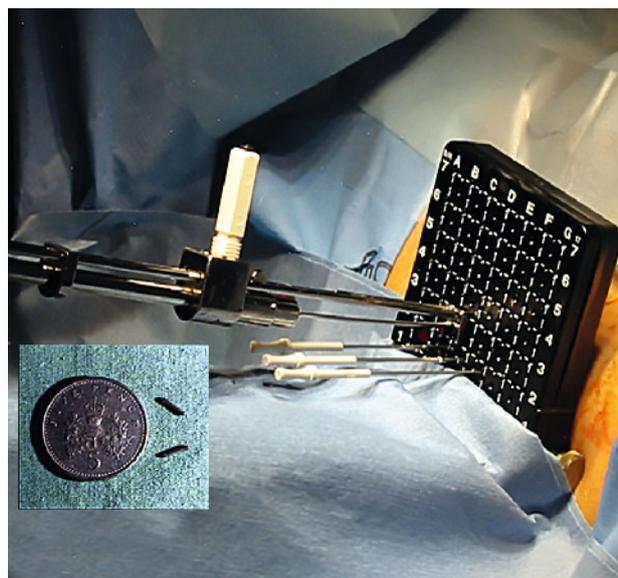


Schéma de principe d'un contrôle de remplissage d'une cuve

USAGE MÉDICAL

Les sources scellées sont utilisées en médecine pour :

- **la curiethérapie** qui consiste à implanter des sources radioactives à l'intérieur du corps, directement sur la lésion à traiter. Cela permet de concentrer les doses sur un petit volume sans agresser les tissus environnants. Les rayons gamma sont délivrés par une source scellée, implantée dans l'organisme, souvent dans une cavité naturelle. Le radium utilisé autrefois a été abandonné au profit de radioéléments artificiels (césium 137 et iridium 192 par exemple) ;
- **le contrôle et l'étalonnage des appareils** utilisés en médecine nucléaire : des sources étalons permettent de vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesure utilisés dans le procédé de diagnostic ou de thérapie ;
- **la stérilisation** : outre les exemples déjà cités précédemment, cette méthode est couramment employée pour stériliser le sang humain avant une transfusion. Les irradiateurs sont constitués d'une cuve blindée qui renferme une source de haute activité au cobalt 60 ou au césium 137.



Curiethérapie sur un patient à l'iode 125

GESTION DES SOURCES SCÉLÉES USAGÉES

LA LÉGISLATION AFFÉRENTE AUX SOURCES

La législation afférente aux sources est regroupée dans le Code de la santé publique, d'une part dans les articles L. 1333-1 et suivants et d'autre part dans les articles R. 1333-152 et suivants.

L'article R. 1333-161 du Code de la santé publique rappelle notamment que :

I. Une source radioactive scellée est considérée comme périmée 10 ans au plus tard après la date du premier enregistrement apposé sur le formulaire de fourniture ou, à défaut, après la date de sa première mise sur le marché, sauf prolongation accordée par l'autorité compétente.

II. Tout détenteur de sources radioactives scellées périmées ou en fin d'utilisation est tenu de les faire reprendre, quel que soit leur état, par un fournisseur qui y est habilité par l'autorisation prévue à l'article L. 1333-8. Les sources radioactives scellées qui ne sont pas recyclables dans les conditions techniques et économiques du moment peuvent être reprises en dernier recours par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Les frais afférents à la reprise de ces sources sont à la charge du détenteur.

Si le détenteur fait reprendre ses sources radioactives scellées par un autre fournisseur que celui d'origine ou si celles-ci sont reprises par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, il transmet, dans le délai d'un mois à compter de la réception de l'attestation de reprise délivrée par le repreneur, copie de cette attestation au fournisseur d'origine et à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

III. Les dispositions des I et II ne sont pas applicables aux sources radioactives scellées dont l'activité, au moment de leur fabrication ou, si ce moment n'est pas connu, au moment de leur première mise sur le marché, ne dépasse pas les valeurs limites d'exemption fixées au tableau 1 et aux deuxième et troisième colonnes du tableau 2 de l'annexe 13-8.

IV. Le fournisseur de sources radioactives scellées, de produits ou

dispositifs en contenant est dans l'obligation de récupérer toute source radioactive scellée qu'il a distribuée, lorsque cette source est périmée ou que son détenteur n'en a plus l'usage ou est défaillant. Les conditions de cette reprise, incluant les frais afférents, sont définies entre le fournisseur et l'acquéreur au moment de la cession de la source et sont conservées par le détenteur et le fournisseur de la source tant que celle-ci n'a pas été reprise. Ces modalités peuvent faire l'objet d'actualisation en fonction des évolutions techniques ou économiques et sont prises en compte lors de la mise en œuvre de la garantie financière mentionnée à l'article R. 1333-162. Lorsque la source a été fournie dans un dispositif ou un produit, le fournisseur est également tenu de le reprendre en totalité si le détenteur en fait la demande. En cas de défaillance du détenteur et si celui-ci n'est pas lui-même le bénéficiaire d'une garantie couvrant les coûts de reprise mentionnés à l'article R. 1333-163, la reprise des sources sans conditions est prescrite au fournisseur par l'Autorité de sûreté nucléaire.

Cette obligation de reprise cesse lorsque le fournisseur arrête toute activité de distribution de sources radioactives scellées. Elle est toutefois maintenue pendant une période de trois ans suivant la date de péremption des sources distribuées dont l'activité, au moment de leur fabrication ou, si ce moment n'est pas connu, au moment de leur première mise sur le marché, dépasse les valeurs limites d'exemption fixées au tableau 1 et aux deuxième et troisième colonnes du tableau 2 de l'annexe 13-8. La date de péremption susmentionnée tient compte des prolongations accordées en application du I pour lesquelles le fournisseur a confirmé le maintien de la garantie financière.

V. Tout fournisseur procède ou fait procéder à l'élimination des sources radioactives scellées reprises dans une installation autorisée à cet effet ou les retourne à son fournisseur ou au fabricant. Il justifie de capacités d'entreposage suffisantes pour recevoir les sources reprises pendant la période précédant leur élimination ou leur recyclage.

OBLIGATION DE REPRISE

La loi française impose aux fournisseurs de reprendre, sur demande du détenteur, toutes les sources scellées qu'il a fournies sur le territoire français.

Afin de permettre la reprise effective des sources, même en cas de défaillance financière de son fabricant, les fournisseurs se sont regroupés au sein de l'association Ressources pour mutualiser les garanties financières et permettre le remboursement à l'Andra ou à tout autre organisme habilité, des frais de reprise des sources.

Cette association avec une soixantaine d'adhérents représente près de 95 % du marché de cette activité.



La gestion des sources

RECYCLAGE DES SOURCES SCELLÉES

Les radioéléments présents dans certaines sources ont une période radioactive très élevée (par exemple, l'américium 241 a une période de 432 ans), la radioactivité à la fin de sa vie a très peu décliné et est alors très proche de sa radioactivité initiale. Après la reprise, certaines sources pourraient être recyclées : selon le type de source (géométrie, matrice, etc.), il serait possible de récupérer les isotopes radioactifs pour les inclure dans un emballage neuf et produire ainsi une nouvelle source. L'emballage usagé serait, pour sa part, traité comme un déchet. Toutefois, aujourd'hui les sources ne sont quasiment pas recyclées, en raison notamment de contraintes techniques importantes (radionucléides emprisonnés dans des matrices difficilement recyclables, etc.) et du coût non négligeable du recyclage.

PRISE EN CHARGE PAR L'ANDRA

Les centres de stockage de l'Andra en exploitation ou en projet peuvent ou pourront accueillir des sources scellées usagées sous réserve qu'elles respectent les critères d'acceptabilité.

La plupart des sources scellées usagées sont actuellement entreposées dans l'attente d'une solution définitive de stockage.

► CIRES

Le Cires a pour vocation de recevoir en stockage définitif des déchets de très faible activité.

Depuis 2015, les spécifications d'acceptation de cette installation permettent le stockage des sources scellées usagées dans le respect de la démonstration de la sûreté du centre.

L'activité de chaque source mise en colis au moment de sa déclaration pour une prise en charge au Cires doit être telle que l'activité résultante suite à une décroissance de 30 ans soit inférieure ou égale à 1 Bq.

Ces sources contiennent des radionucléides de courte période, tels que le cobalt 57 (période de 272 jours), le fer 55 (2,7 ans) ou le zinc 65 (244 jours), elles ne sont donc pas recyclables.

► CSA

Depuis 2006, une spécification d'acceptation précise les modalités de prise en charge de colis de sources scellées usagées. Avant 2006, les sources pouvaient être acceptées au CSA, mais uniquement sur dérogation de l'ASN.

Entre autres, les sources contenues dans un même colis ne doivent posséder qu'un seul et même radionucléide d'une période inférieure à 30 ans. Des sources contenant du cobalt 60 (période de 5,3 ans) et de radioéléments de période plus courte sont actuellement stockées au CSA.

La limitation de l'acceptabilité des sources scellées dans les centres de stockage radioactifs en surface est due à leur activité concentrée et leur caractère potentiellement attractif (les sources sont des objets manufacturés, de petite taille, qui peuvent être mis dans une poche ou conservés comme bibelots, détruits ou ingérés). Il est donc important que l'activité résiduelle n'induise pas d'effet inacceptable à une date où la mémoire du site est supposée perdue (300 ans) et où l'intrusion humaine (chantiers routiers, constructions, etc.) est possible.

► FA-VL

À ce jour, la conception d'un stockage pour les déchets de type FA-VL (faible activité à vie longue) n'est pas figée. Les caractéristiques des sources acceptables dans ce type de stockage

dépendront de la conception. Les sources qui seront destinées à ce stockage seront celles qui ne seront pas acceptables au CSA, et pour lesquelles un stockage au Cigéo n'est pas justifié du point de vue de la sûreté.

Ces sources seront conditionnées en colis de sorte à respecter les spécifications d'acceptation qui seront fixées par l'Andra.

► CIGÉO

Le centre de stockage en projet Cigéo est conçu pour stocker en couche géologique profonde les déchets hautement radioactifs ainsi que des déchets moyennement radioactifs à durée de vie longue (déchets HA et MA-VL).

Conformément aux dispositions de l'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement, les sources scellées qui ne peuvent être stockées en surface ou à faible profondeur feront l'objet d'un stockage en couche géologique profonde à Cigéo.

Ces sources seront conditionnées en colis de sorte à respecter les spécifications d'acceptation qui seront fixées par l'Andra.

ÉVOLUTIONS DE L'USAGE DES SOURCES SCÉLÉES POUR CERTAINES ACTIVITÉS

Afin de respecter le principe de justification et l'utilisation des sources scellées imposant de nombreuses contraintes, des solutions alternatives sans radioactivité sont à privilégier.

Pour exemple :

- les sources scellées utilisées pour la radiothérapie externe ont été remplacées par des accélérateurs de particules qui n'émettent des rayonnements que s'ils sont alimentés électriquement ;
- les parasurtenseurs qui contenaient de la radioactivité ont été remplacés par des parasurtenseurs contenant divers composants électroniques sans radioactivité ;
- le radium présent dans les objets radioluminescents a été progressivement remplacé par du tritium (dont la toxicité est moindre), lui-même remplacé par de la peinture photoluminescente quand cela a été possible ;
- les pacemakers alimentés par un générateur électrique au plutonium 238 ont été remplacés par des stimulateurs cardiaques alimentés par une pile « iode/lithium » ;

- les détecteurs de fumée ioniques (source américium) ont été remplacés par des détecteurs optiques contenant une led et une cellule photo-électrique.

Selon le type de sources, la réglementation peut imposer la mise au rebut de ces dispositifs radioactifs même s'ils sont encore fonctionnels ou, au contraire, permettre leur utilisation jusqu'à leur fin de vie.



Détecteur de fumée ionique

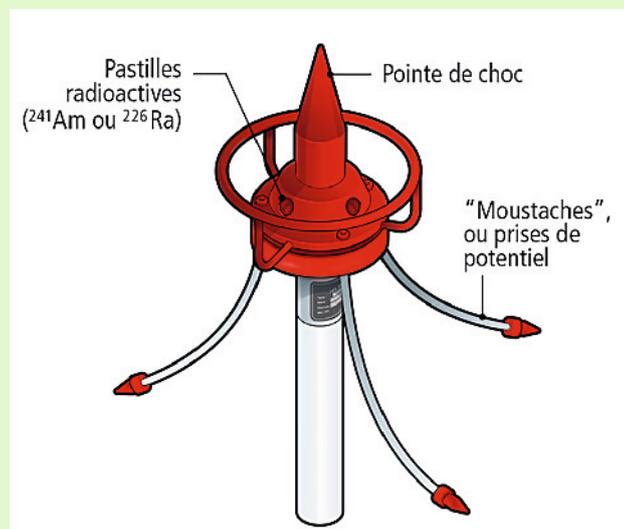
LES PARATONNERRES

Au début du xx^e siècle, des sources radioactives ont été ajoutées sur les têtes de paratonnerres afin de renforcer l'ionisation naturelle de l'air et ainsi l'efficacité du paratonnerre. Ils ont été fabriqués en France de 1932 à 1986 par les sociétés Helita puis Duval Messien, Franklin France et Indelec. Leur supplément d'efficacité n'ayant pas été démontré, leur fabrication a été interdite par l'arrêté du 11 octobre 1983 applicable au 1^{er} janvier 1987.

Aucun texte n'impose leur retrait, mais, chaque fois que l'un d'entre eux est démonté, il doit être évacué en tant que déchet radioactif auprès de l'Andra.

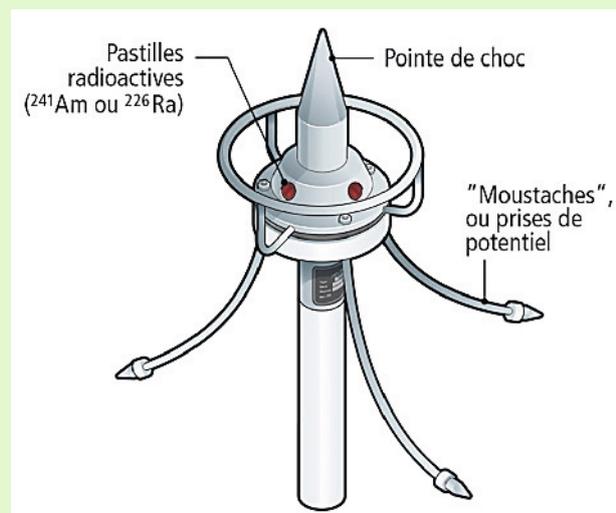
Le nombre total de paratonnerres installés en France est estimé à environ 50 000 dont 30 000 équipés de sources au radium 226 (ou à la fois de sources de radium 226 et d'américium 241-paratonnerre mixtes) et 20 000 équipés de sources à l'américium 241.

L'activité moyenne d'une tête de paratonnerre au radium 226 est d'environ 50 mégabecquerels, celle d'une tête de paratonnerre à l'américium 241 d'environ 20 mégabecquerels.



Traitement global d'une tête de paratonnerre (schéma 1)

Les substances radioactives se présentent sous la forme de pastilles frittées, de plaquettes, de feuilles ou de billes de porcelaine peintes, généralement de petites dimensions.



Traitement localisé d'une tête de paratonnerre (pastilles) (schéma 2)

Initialement, la tête radioactive d'un paratonnerre était traitée globalement.

Cette tête retirée était considérée comme un déchet FA-VL (voir schéma 1).

Afin d'optimiser l'espace de stockage, l'Andra a le projet de retirer simplement les pastilles qui concentrent toute la radioactivité (voir schéma 2). Les pastilles seraient regroupées dans des fûts de 870 litres puis entreposés en attente de stockage à Cigéo. Par précaution, le reste de la tête du paratonnerre serait considéré comme déchet TFA. Dans l'attente de la réalisation de ce projet, ces paratonnerres sont orientés vers la plateforme d'entreposage de l'Andra au Cires.



DOSSIER

07

Les inventaires des déchets radioactifs à l'étranger

FINALITÉ DES INVENTAIRES DE DÉCHETS	145
DIRECTIVE EUROPÉENNE RELATIVE À LA GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS (2011/70/EURATOM)	148
Rappel du contexte	148
Mise en œuvre de la directive	149
LE SUIVI RÉALISÉ PAR L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE (AIEA)	150
L'INVENTAIRE DANS QUELQUES PAYS	151
Royaume-Uni	151
Belgique	151
Allemagne	152
Espagne	153
États-Unis	153
Canada	155
Suède	156

FINALITÉ DES INVENTAIRES DE DÉCHETS

La première étape pour établir l'inventaire des déchets radioactifs est de définir une classification des déchets radioactifs. À l'Agence pour l'énergie nucléaire, un groupe de travail est consacré à la thématique de l'inventaire des combustibles usés et des déchets radioactifs, au niveau international.

Ce groupe a publié un rapport en 2016 qui fait un bilan des aspects classification et inventaire de déchets radioactifs¹ et notamment

l'état des différentes approches internationales aujourd'hui et en cours de développement, celle initiée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), celle pratiquée dans la NEWMDB (*Net Enabled Waste Management Database*), celle de la Commission européenne et enfin celle de l'AEN elle-même.

LES INSTANCES INTERNATIONALES

L'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) est une agence spécialisée de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Elle a pour mission d'« aider ses pays membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques. Elle s'emploie à fournir des évaluations faisant autorité et à dégager des convergences de vues sur des questions importantes, qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales de l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable des économies bas carbone². »

Créée en 1957 par les Nations Unies en tant qu'organisme indépendant, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a pour mission de promouvoir l'utilisation sûre des technologies nucléaires à des fins pacifiques. Elle compte 168 États membres. L'une des principales missions de l'AIEA consiste à prévenir la prolifération des armes nucléaires³. L'AIEA met à disposition une base de données commune à l'ensemble des pays,

la NEWMDB⁴. Cette base contient notamment des informations sur les programmes de gestion des déchets radioactifs, les inventaires de déchets et la législation.

La **Convention commune** sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté des déchets radioactifs a été approuvée par la France le 22 février 2000 et est entrée en vigueur le 18 juin 2001. Cette convention prévoit que chaque partie contractante présente, lors des réunions d'examen (tous les trois ans), un rapport décrivant la façon dont elle met en œuvre les obligations de la convention. Au 31 décembre 2016, 75 parties contractantes avaient ratifié la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs.

Signé en 1957, le traité **Euratom** a pour but de permettre le développement de l'énergie nucléaire des pays de l'Union européenne tout en assurant la protection de la population et des travailleurs contre les effets nocifs des rayonnements ionisants. C'est à ce titre que la **Commission européenne** élabore des directives que les États membres ont l'obligation de traduire dans leur droit national.

L'inventaire couvre plusieurs finalités, parmi lesquelles il se doit :

- d'apporter un support à la définition du programme de gestion des déchets radioactifs, d'établir un état des lieux permettant de prévoir les installations nécessaires et les programmes de R&D destinés à apporter des réponses aux déchets sans solution disponible ;
- de veiller à ce que les informations associées à l'entreposage et au stockage des déchets à long terme soient préservées, conformément aux exigences de gestion de la qualité et appropriées aux besoins des générations futures (*Retrieval*,

Restoration and Maintenance of Old Radioactive Waste Inventory Records - IAEA-TECDOC-1548) ;

- d'établir « un inventaire de tous les combustibles usés et des déchets radioactifs produits ainsi qu'une prévision des quantités à venir, y compris celles résultant du démantèlement. Cet inventaire indique la localisation et la quantité de déchets radioactifs et de combustible usé, conformément à la classification appropriée des déchets radioactifs », selon la directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011.

¹ *National Inventories and Management Strategies for Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste. Methodology for Common Presentation of Data*. OECD 2016. NEA No. 7323.

² oecd-nea.org ; Le plan stratégique de l'Agence pour l'énergie nucléaire 2017-2022.

³ iaea.org.

⁴ newmdb.iaea.org.

Au travers de ces inventaires, les pays rendent compte des volumes de déchets radioactifs produits et de leurs situations (par exemple l'existence de filières de stockage). Ils transmettent également des informations sur leur localisation, radioactivité,

conditionnement, origine, destination etc. Ces inventaires sont publiés régulièrement, notamment par les signataires de la Convention commune sur la sûreté de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs de l'AIEA.

CLASSIFICATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS À L'INTERNATIONAL

La classification des déchets radioactifs diffère généralement d'un pays à un autre. Sous l'impulsion d'organismes internationaux comme l'AIEA, l'OCDE/AEN et pour ce qui concerne l'Europe, la directive 2011/70/Euratom, une convergence vers une

classification commune au niveau international est en cours. Le tableau suivant présente les dénominations globalement admises par rapport à la classification française.

Classification française des déchets radioactifs		Équivalence avec classification AIEA (GSG-1)
Déchets de très faible activité (TFA)	<i>Very Low Level Waste (VLLW)</i>	<i>Very Low Level Waste (VLLW)</i>
Déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)	<i>Low and Intermediate Level Waste Short Lived (LILW-SL)</i>	<i>Low Level Waste (LLW)</i>
Déchets de faible activité à vie longue (FA-VL)	<i>Low Level Waste Long Lived (LLW-LL)</i>	<i>Intermediate Level Waste (ILW)</i>
Déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)	<i>Intermediate Level Waste Long Lived (ILW-LL)</i>	<i>Intermediate Level Waste (ILW)</i>
Déchets de haute activité (HA)	<i>High Level Waste (HLW)</i>	<i>High Level Waste (HLW)¹</i>

Dans les rapports en anglais sera également mentionnée la catégorie *Exempted Waste (EW)* qui n'existe pas en France car il n'y a pas de seuil de libération.

Les frontières entre ces catégories doivent être détaillées afin de pouvoir établir des comparaisons et des inventaires à l'échelle internationale (AIEA GSG-1, voir paragraphe 3, le suivi réalisé par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)).

Historiquement, la Commission européenne avait entrepris une évaluation de ses pays membres publiée en 2009². Cette évaluation donnait un aperçu des systèmes de suivi des données nationales sur les déchets, mis en œuvre par les États membres de l'Union européenne. Elle établissait des recommandations pour les futurs

systèmes de gestion des déchets. L'étude couvrait la collecte, la publication et la gestion des données des déchets radioactifs et combustibles usés dans les États membres de l'Union européenne et les pays candidats cités dans le tableau suivant.

► TYPE DE BASE DE DONNÉES D'INVENTAIRE NATIONAL DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

Type de base de données	Pays
Base de données informatique centralisée avec soumission électronique des données	Allemagne, Belgique, Croatie, Espagne, Estonie, Finlande, Hongrie, Italie, Lettonie, Macédoine, Pays-Bas, Roumanie, Slovaquie, Royaume-Uni
Base de données informatique située à la centrale nucléaire	Lituanie
Base de données informatique centralisée avec soumission des données par réseau	France ³ , République Tchèque
Base de données informatique centralisée avec collecte des données par bordereau papier	Bulgarie, Slovaquie
Archive centralisée sur papier avec collecte des données par bordereau papier	Grèce
Non mentionné	Autriche, Chypre, Danemark, Irlande, Luxembourg, Malte, Pologne, Suède, Turquie

Tous ces pays disposent de spécifications réglementaires concernant la tenue d'un système de collecte de données nationales sur les déchets et les combustibles usés.

Le système national de collecte de données est organisé de différentes manières en fonction de l'importance du programme nucléaire de l'État et de la gestion des déchets mis en place.

L'attribution des responsabilités pour la tenue d'un inventaire est généralement précisée dans le cadre réglementaire.

¹ Cette catégorie comprend les déchets vitrifiés ou les combustibles usés (*Spent Fuel, SF*).

² *Radioactive Waste and Spent Fuel Data Collection, Reporting, Record Keeping and Knowledge Transfer by EU Member States Final Report* BS-Project N°. 0707-03 Contract N°. TREN/07/NUCL/S07.78807.

³ Postérieurement à la parution de l'étude.

Le tableau suivant montre les objectifs des pays par rapport à la réalisation des bases de données d'inventaire pour leurs déchets radioactifs. Il y apparaît que la gestion des capacités des

installations (volume de stockage disponible) constitue l'une des préoccupations majeures.

► OBJECTIFS DES PAYS POUR LA RÉALISATION DE BASE DE DONNÉES D'INVENTAIRE

Pays	Décision politique	Information du public	Plan de gestion	Sécurité	Gestion financière	Gestion technique
Allemagne	X	X	X		X	
Autriche			X	X	X	X
Belgique	X	X	X			X
Bulgarie		X	X	X	X	X
Croatie	X	X	X	X	X	X
Chypre			Non communiqué			
Danemark		X	X	X		X
Espagne	X		X	X	X	X
Estonie	X		X			
Finlande	« Les principaux objectifs de la base de données sont : de servir de support à la réglementation sur les déchets et les inspections associées ; de faire un état d'avancement régulier aux ministères ; d'informer le public »					
France	X	X	X			
Grèce			Non communiqué			
Hongrie	X	X	X	X	X	X
Irlande						
Italie		X	X			
Lettonie	X	X	X	X	X	X
Lituanie			X			X
Luxembourg						X
Macédoine		X	X	X	X	X
Malte			Non communiqué			
Pays-Bas			Non communiqué			
Pologne			Non communiqué			
Portugal			Non communiqué			
République Tchèque	X	X	X	X	X	X
Roumanie		X	X		X	X
Slovaquie		X	X		X	X
Slovénie	X	X	X	X	X	X
Suède			Non communiqué			
Turquie			Non communiqué			
Royaume-Uni	X	X	X			X

Ce travail d'inventaire au sein de la Commission européenne a été précisé par la directive de 2011 décrite ci-après.

Dans les chapitres suivants sont présentés les travaux accomplis sur la thématique de l'inventaire des déchets radioactifs, par différentes instances internationales, plus précisément l'AIEA et

l'Union européenne. La tendance actuelle est de faire coïncider les calendriers ou d'exploiter les mêmes données dans les rapports que les différents pays doivent fournir. Ce point est mentionné dans les pays présentés par la suite.

DIRECTIVE EUROPÉENNE RELATIVE À LA GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS (2011/70/EURATOM)

RAPPEL DU CONTEXTE

En 2011, le Conseil de l'Union européenne a adopté la directive 2011/70/Euratom qui établit un cadre communautaire pour la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, depuis leur production jusqu'à leur stockage. Elle complète ainsi les instruments législatifs d'Euratom qui ne traitaient pas encore de ce sujet. Elle responsabilise les États membres de l'Union européenne et les producteurs sur une gestion responsable et sûre des combustibles usés et des déchets radioactifs ainsi que sur la protection des personnes et de l'environnement contre les dangers des rayonnements ionisants.

Elle impose aux États membres de se doter d'un cadre légal de sûreté nucléaire avec :

- une autorité de sûreté et de contrôle compétente, indépendante des producteurs de déchets ;
- des titulaires d'autorisation à même de démontrer et de maintenir la sûreté de leurs installations en matière de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs, sur toute leur durée de vie.

Elle impose aussi aux États membres d'établir un programme national pour élaborer et mettre en œuvre la politique de gestion des combustibles usés et de déchets radioactifs doté :

- d'objectifs généraux que les politiques nationales des États membres de l'Union européenne auront à atteindre en matière de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs ;
- d'échéances importantes en tenant compte des objectifs à atteindre pour les programmes nationaux ;
- d'un inventaire de tous les combustibles usés et déchets radioactifs, et des estimations relatives aux quantités futures, y compris celles résultant d'opérations de démantèlement. Cet inventaire doit indiquer clairement la localisation et la quantité des déchets radioactifs et du combustible usé, conformément à la classification appropriée des déchets radioactifs.

Par ailleurs, les États membres de l'Union européenne devront :

- assurer les ressources filières nécessaires à la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs ;
- maintenir les ressources humaines adéquates ;
- assurer la transparence de l'information et la participation du public ;
- réexaminer et mettre à jour régulièrement leur programme national pour prendre en compte les évolutions et les progrès, et faire réaliser des revues par les pairs ;
- stocker les déchets radioactifs produits dans l'État membre où ils ont été produits. Toutefois, la directive ouvre la possibilité aux États membres de l'Union européenne de pouvoir stocker leurs déchets radioactifs dans un autre pays (État membre ou, sous certaines conditions, État tiers).

Cette directive est entrée en vigueur le 23 août 2011 et les États membres de l'Union européenne disposaient d'un délai de deux ans pour la transposer en droit national.

Dans ses attendus, la directive mentionne que le stockage géologique constitue la solution la plus sûre et la plus durable en tant qu'étape finale de la gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue. En effet, dans la plupart des pays le stockage géologique s'est imposé, après de nombreuses recherches portant sur différentes options, comme une solution à long terme.

Les États membres de l'Union européenne devaient remettre à la Commission un rapport sur la mise en œuvre de la directive à l'échéance du 23 août 2015, puis tous les trois ans, en mettant à profit les évaluations et rapports rédigés au titre de la Convention commune.

Enfin, la Commission européenne doit remettre au Parlement européen et au Conseil tous les trois ans :

- un rapport sur les progrès réalisés dans le cadre de la mise en œuvre de la directive ;
- un inventaire des combustibles usés et des déchets radioactifs présents sur le territoire de la Communauté et des prévisions pour l'avenir.

Le premier rapport a été publié en 2017¹.

¹ Rapport de la Commission européenne au Conseil et au Parlement européen sur l'avancement de la mise en œuvre de la directive 2011/70/Euratom du Conseil, un inventaire des déchets radioactifs et du combustible usé présents sur le territoire de la Communauté et les perspectives futures.

MISE EN ŒUVRE DE LA DIRECTIVE

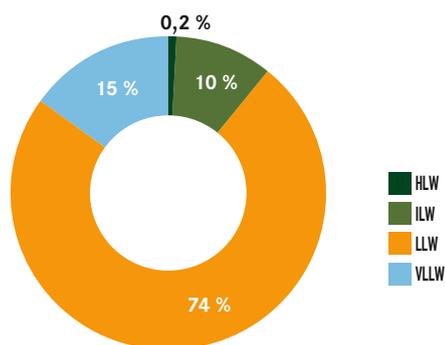
Tous les États membres de l'Union européenne ont, à présent, achevé la transposition de la directive et ont rempli leurs obligations : rapports, programmes nationaux ou projets de programmes. C'est sur la base des informations disponibles dans ces documents, qu'en 2017 le premier rapport de la Commission européenne sur l'application de la directive, a été remis au Parlement européen et au Conseil.

Ce rapport¹ comme indiqué au paragraphe précédent, présente un inventaire des déchets radioactifs et des combustibles usés dans l'Union européenne, les politiques et programmes nationaux en matière de gestion des déchets radioactifs et combustibles usés. Les cadres nationaux et le contexte réglementaire dans l'ensemble des pays y sont aussi mentionnés. La figure suivante présente la consolidation, au niveau européen, des volumes de déchets radioactifs et les quantités de combustibles usés.

► ÉVOLUTION DES QUANTITÉS TOTALES DE DÉCHETS RADIOACTIFS ET DE COMBUSTIBLE USÉ AU COURS DE LA PÉRIODE 2004-2013²

Catégorie de déchets	2004	2007	2010	2013
	Volume total (m ³)			
VLLW	210 000	280 000	414 000	516 000
LLW	2 228 000	2 435 000	2 356 000	2 453 000
ILW	206 000	288 000	321 000	338 000
HLW	5 000	4 000	5 000	6 000
Masse totale (t)				
Combustible usé	38 100	44 900	53 300	54 300

► RÉPARTITION ENTRE LES CATÉGORIES DE DÉCHETS RADIOACTIFS (FIN 2013)²



Le rapport conclut sur le soutien que la Commission apportera aux États membres de l'Union européenne concernant les différents aspects contenus dans la directive, et notamment sur les travaux que la Commission compte effectuer pour avoir une vision d'ensemble des coûts et des financements de la gestion des déchets radioactifs. La Commission s'engage aussi à analyser de façon approfondie les inventaires dans chaque pays.

1 Rapport de la commission au Conseil et au Parlement européen, COM-2017 236 final.

2 Extrait de l'inventaire européen de déchets radioactifs et combustibles usés. Source: COM-2017 236 final.

LE SUIVI RÉALISÉ PAR L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE (AIEA)

L'AIEA, agence de l'Organisation internationale des Nations unies (ONU), met à la disposition du public une base de données, appelée NEWMDB (*Net Enabled Waste Management DataBase*), qui est en premier lieu une base d'inventaire des déchets radioactifs des différents pays membres. Les données sont mises à jour régulièrement et leurs présentations tendent à s'harmoniser entre les pays.

Chaque pays, qui dispose généralement de sa propre classification de déchets radioactifs, peut la transposer dans celle de l'AIEA, précisée dans le guide général de sûreté GSG-1¹. Dans la NEWMDB, les quantités de déchets sont renseignées selon la classification nationale et la classification internationale dans le but de pouvoir sommer et comparer ces quantités.

Par ailleurs, les volumes d'inventaire de déchets radioactifs dans chaque pays peuvent être établis de différentes manières : volumes de déchets bruts, traités, conditionnés, entreposés ou encore prêts à être stockés. Cependant, la tendance s'oriente vers une harmonisation des volumes reportés qui sont de plus en plus des volumes de déchets stockables (volume équivalent conditionné).

Tous les trois ans, les pays membres publient sous l'égide de l'AIEA, un rapport national dans le cadre de la Convention commune sur la sûreté de la gestion des combustibles usés et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs. La dernière conférence s'est déroulée en 2015 au siège de l'AIEA à Vienne (Autriche). Une part de ces rapports est consacrée aux inventaires des déchets radioactifs et des combustibles usés existants mis à jour à l'occasion de leurs publications.

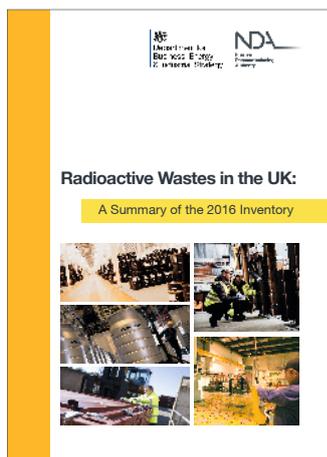
Les rapports nationaux publiés par les pays membres sont accessibles, si l'État membre l'autorise, à partir du site de l'AIEA. Pour la réunion de la sixième révision de la Convention commune de l'AIEA (mai/juin 2018) les rapports des pays suivants ont été publiés :

- Allemagne;
- Argentine;
- Australie;
- Belgique;
- Brésil;
- Canada;
- Corée;
- Danemark;
- Émirats Arabes Unis;
- Espagne;
- Estonie;
- États-Unis;
- Euratom;
- Fédération de Russie;
- Finlande;
- France;
- Irlande;
- Japon;
- Lituanie;
- Norvège;
- République Tchèque;
- Royaume-Uni;
- Slovaquie;
- Slovénie;
- Suède.

1 IAEA Safety Standards series n° GSG-1, 2009.

L'INVENTAIRE DANS QUELQUES PAYS

ROYAUME-UNI



Au Royaume-Uni, un inventaire est réalisé tous les trois ans par l'autorité de démantèlement nucléaire, la NDA en partenariat avec le ministère de l'Énergie et du changement climatique (DECC).

La dernière parution en 2016, publiée en mars 2017, dresse l'état des déchets existants au 1^{er} avril 2016 et présente l'ensemble des déchets à venir au Royaume-Uni. L'ensemble des documents de l'inventaire est accessible directement à partir du site dédié nda.gov.uk/ukinventory. Cinq documents composent ce rapport, appelé *2016 UK Radioactive Waste & Materials Inventory (2016-UKRWMI)* :

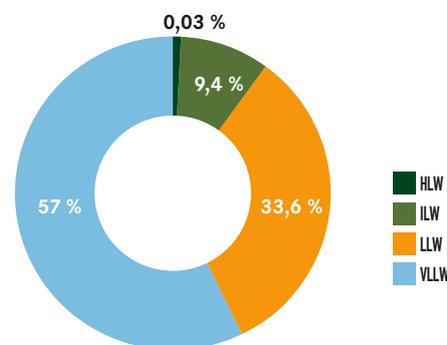
- contexte et méthodologie ;
- résumé des points importants ;
- déchets et matières radioactives non traitées dans l'UKRWMI ;
- résumé des données pour les instances internationales ;
- rapport d'inventaire.

Cet ensemble de documents comprend des informations sur les quantités, types et caractéristiques des déchets existants et à produire. Les prévisions sont fondées sur des hypothèses de production d'électricité, de démantèlement et de choix de filière.

À l'exception du centre de stockage de déchets de faible et moyenne activité à vie courte, le LLRW Repository situé près de la commune de Drigg, non loin de Sellafield, aucun site nucléaire ne répertorie de déchets radioactifs autres que ceux qu'il produit. L'inventaire 2016 relève 1 337 sites et filières de déchets qui concernent les activités de l'industrie nucléaire, la défense mais aussi celles des petits producteurs. Il comptabilise les déchets produits ou prévus, situés principalement sur leur lieu de production et qui n'ont pas encore été définitivement stockés.

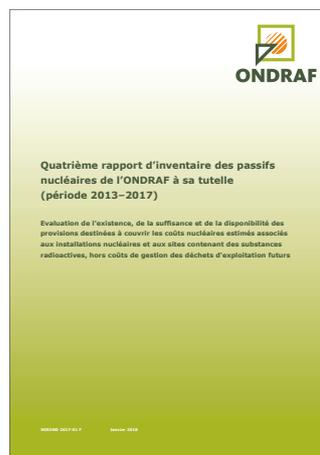
► L'INVENTAIRE DES DÉCHETS RADIOACTIFS AU ROYAUME-UNI¹

Type	Total (m ³)
VLLW	2 720 000
LLW	1 600 000
ILW	449 000
HLW	1 500
Total	4 770 000



Le résumé de l'inventaire du Royaume-Uni, destiné à une publication internationale, répond aux besoins de déclaration d'inventaire des déchets radioactifs à des instances comme l'AIEA, la Commission européenne ou encore l'AEN/OCDE. Il reprend la classification à la fois des déchets radioactifs à vie courte et à vie longue au Royaume-Uni.

BELGIQUE



L'Ondraf, Organisme national des déchets radioactifs en Belgique, est chargé de dresser un inventaire qui comporte deux volets : les substances radioactives présentes sur le territoire belge et les « passifs nucléaires » qui inventorier les différents sites et producteurs de déchets radioactifs.

¹ Source : *Radioactive Wastes in the UK: A Summary of the 2016 Inventory*.

Cette mission lui a été confiée par l'arrêté royal du 16 octobre 1991 et a été étendue à tous les sites et producteurs par la loi du 12 décembre 1997.

L'Ondraf tient à jour, de façon permanente, un inventaire quantitatif et qualitatif de tous les déchets radioactifs présents en Belgique et à venir, y compris les matières fissiles inutilisées et les déchets futurs de démantèlement des installations nucléaires.

L'inventaire est quinquennal et le dernier publié en 2018 portait sur la période 2013-2017.

Cet inventaire répertorie 608 sites comportant des déchets radioactifs, des matériaux radioactifs issus des démantèlements et des matières nucléaires. Ils sont classés en trois catégories : I (centrales électronucléaires, anciennes usines du cycle, sites de recherche, etc.), II (laboratoires, sites industriels, hôpitaux, centres d'enseignement, etc.) et III (sites industriels et laboratoires contenant des sources scellées). Il faut également y ajouter un site contaminé et quatre cas particuliers.

L'inventaire établit des prévisions de volumes de déchets selon un scénario qui suppose que l'ensemble des installations nucléaires existantes soit démantelé et ne produise plus de déchets. Cet horizon de temps dépend grandement des scénarios et calendriers de gestion considérés : le scénario de gestion des combustibles usés, les scénarios de démantèlement des installations, les calendriers du stockage, etc.

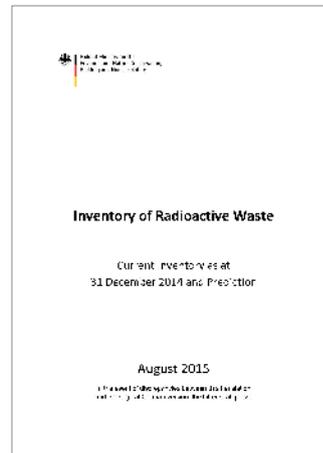
L'inventaire répertorie des sites non nucléaires comme celui d'Olen qui contient les déchets radifères de traitement de minerais, ou encore des installations qui détiennent des sources radioactives.

L'inventaire réalisé en Belgique vise à assurer que les moyens financiers nécessaires existent bien pour permettre la prise en compte de l'ensemble des déchets par ceux qui les ont produits. Il s'agit d'éviter qu'ils ne deviennent un passif, c'est-à-dire une charge pour la collectivité si ces moyens étaient insuffisants ou manquants. Dans la suite de l'édition 2013, la version de 2018 de l'inventaire belge accorde une grande importance à l'évaluation des moyens financiers et des provisions qui leur sont associées et de leur disponibilité. Définie par l'article 9 de la loi-programme du 12 décembre 1997, la mission d'inventaire des passifs nucléaires confiée à l'Ondraf (nirond.be) consiste à :

- « établir un répertoire de la localisation et de l'état de toutes les installations nucléaires et de tous les sites contenant des substances radioactives ;
- estimer leur coût de déclassement et d'assainissement ;
- évaluer l'existence et la suffisance des provisions pour le financement de ces opérations en cours ou futures ;
- mettre cet inventaire à jour tous les cinq ans. »

Le quatrième rapport d'inventaire est public et accessible sur le site Internet de l'Ondraf/Niras. Une synthèse de l'inventaire est également disponible.

ALLEMAGNE



Depuis 1984 le Bureau fédéral de radioprotection (BfS) est en charge de collecter et de mettre à jour des données de base de l'inventaire des déchets radioactifs. Ces données sont les quantités et volumes existants ainsi que les prévisions pour l'année suivante, pour chaque décennie jusqu'à l'horizon 2080.

Le BfS procédait annuellement par enquête auprès des producteurs, au moyen d'un questionnaire portant sur les volumes des déchets produits, traités et conditionnés. Cela ne concernait que les déchets devant être stockés.

La réorganisation, depuis 2016, du cadre institutionnel concernant les déchets radioactifs en Allemagne, fait que la mission de réalisation de l'inventaire des déchets radioactifs, revient dorénavant à la BGE (Compagnie fédérale pour le stockage de déchets radioactifs).

En Allemagne, les déchets susceptibles d'être libérés au sens de la radioprotection¹ ne sont pas comptabilisés dans l'inventaire. Il s'agit principalement d'uranium appauvri ainsi que d'uranium et de plutonium issus du retraitement utilisés dans la fabrication d'éléments combustibles.

L'uranium et le plutonium recyclés sont cependant comptabilisés annuellement par le ministère de l'Environnement, de la Préservation de la nature et de la Sécurité nucléaire (BMU). Les volumes de déchets présents et futurs sont complétés par des données chimiques qui mentionnent les compositions organiques des déchets et les substances dangereuses, non organiques, en rapport avec la préservation de l'eau du sous-sol.

Les prévisions de production de déchets radioactifs sont aujourd'hui établies par le BfS selon un scénario modifié par le treizième amendement du 6 août 2011, de la loi sur l'énergie nucléaire (loi atomique).

Avec cet amendement, pris consécutivement aux événements survenus en 2011 au Japon conduisant à reconsidérer les risques

¹ En application de la directive 2013/59/Euratom du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants, les États membres de l'Union européenne peuvent mettre en œuvre des seuils dits de libération en deçà desquels les matériaux considérés sortent du domaine réglementé. Lorsque le concept de seuils de libération, est utilisé, en fonction des pays, ces seuils peuvent être, pour un radioélément donné, soit universels (quels que soient le matériau, son origine et sa destination), soit dépendant du matériau, de son origine et de sa destination.

liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire, huit autorisations d'exploitation de centrales nucléaires n'ont pas été renouvelées.

Les autorisations d'exploitation des réacteurs restants prendront fin d'ici 2022. La version publique de l'Inventaire national en Allemagne sous une forme exhaustive, détaillant tous les aspects de sa réalisation, n'est pas encore publiée. Elle pourrait constituer l'un des volets du futur Plan national de gestion des déchets radioactifs, où le choix du futur site de stockage des déchets exothermiques reste à définir. D'autre part, sur un plan légal et réglementaire, le décret de 2001 sur la radioprotection contient des dispositions sur les déchets radioactifs prises en application des normes énoncées dans la loi atomique.

Conformément à ce décret, le titulaire d'une autorisation est tenu de fournir à l'avance et annuellement les prévisions de quantité de déchets radioactifs qui résulteront de ses activités et de décrire la façon dont ils seront gérés et stockés. Il lui faut également établir un inventaire des déchets radioactifs dans les formes prévues à l'annexe du même décret.

L'inventaire des déchets radioactifs et des combustibles usés en Allemagne est donc régulièrement établi par l'Office fédéral de radioprotection – BfS (BGE, depuis 2017). Une présentation en est faite tous les trois ans par le rapport de la République fédérale d'Allemagne à la Convention commune sur la sûreté de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs. Ce rapport national a été publié en 2014 en préparation de la cinquième conférence de l'AIEA sur la Convention commune de mai 2015.

Enfin, en lien avec le Plan national de gestion des déchets radioactifs établi à la demande de la directive 2011/70/Euratom, les informations et données sur les quantités de déchets radioactifs et de combustibles usés sont présentées à la Commission européenne.

ESPAGNE

Enresa (l'homologue de l'Andra en Espagne) réalise et met à jour un inventaire des déchets radioactifs produits en Espagne sur la base des informations fournies par les producteurs de déchets. Les premières études d'inventaire ont démarré en 1986, en même temps que le premier Plan général des déchets radioactifs. Aujourd'hui, les informations sont rassemblées dans une base de données à partir de laquelle est élaboré un document de synthèse.

Le décret royal 102/2014, portant sur la responsabilité et la sûreté des combustibles usés et des déchets radioactifs, réglemente les activités d'Enresa et son financement. Cet organisme public a la charge de dresser un inventaire des déchets radioactifs entreposés et stockés, ainsi qu'un inventaire des déchets des installations démantelées ou fermées. En application de ce décret, le *Plan General de Residuos Radiactivos* (PGRR, Programme général de déchets radioactifs) comprend un inventaire des combustibles usés et des déchets radioactifs produits et à produire, indiquant précisément leurs quantités et emplacements, en fonction d'une

classification fondée sur leur destination ultime. La dernière publication du PGRR espagnol date de 2006. Le rapport en application de la directive 2011/70/Euratom fournit les dernières données d'inventaire de déchets radioactifs. Ce rapport est sous la responsabilité du CSN (*Consejo de Seguridad Nuclear*, Autorité de sûreté) mais Enresa consolide les données des producteurs de déchets.

Le contrat établi entre les producteurs de déchets et Enresa fait obligation aux producteurs de fournir un inventaire initial présentant par type et quantité de déchets radioactifs la situation réelle au moment de la signature du contrat. En complément, le producteur doit indiquer tous les ans :

- les estimations prévisionnelles à cinq ans des déchets radioactifs d'exploitation à produire, classés par famille ;
- les estimations prévisionnelles à 10 ans des combustibles ;
- les estimations prévisionnelles à cinq ans des déchets radioactifs spéciaux et particuliers ;
- les inventaires de déchets produits l'année précédente, par famille (exploitation, combustibles usés et déchets spéciaux et particuliers) ;
- le programme à venir de fermeture des installations.

Une base de données nationale des déchets radioactifs et des combustibles usés est tenue à jour par Enresa.

Son principal objectif consiste à contribuer à la planification d'exploitation et stratégique de la gestion des déchets. Cet inventaire n'est pas publié directement et publiquement par Enresa. Il fait cependant l'objet d'une description, par l'intermédiaire de la NEWMDB de l'AIEA, et par le rapport national espagnol publié à l'occasion des conférences de la Convention commune sur la gestion sûre des combustibles usés et des déchets radioactifs organisée par l'AIEA.

ÉTATS-UNIS

Plusieurs systèmes d'inventaire et de suivi des déchets radioactifs existent aux États-Unis. Ils diffèrent selon les organismes chargés de les réglementer :

- le *Department of Energy* (DOE) pour le secteur de la défense, dépendant du Gouvernement fédéral ;
- la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) pour le secteur commercial.

L'origine et la nature des déchets conditionnent souvent le lieu de stockage.

La NRC réalise des inventaires nationaux pour les combustibles usés du secteur commercial et les sources scellées.

Pour les autres catégories de déchets, il n'existe pas de système national d'inventaire qui rassemble de façon homogène l'ensemble des informations de chaque installation et organisme, qu'il soit un producteur, un intermédiaire dans la gestion des déchets (*broker* ou *processor*) ou un gestionnaire de stockage.

Cependant, les producteurs de déchets du secteur électronucléaire commercial établissent des manifestes d'expédition des déchets vers des intermédiaires (*Manifest Information Management System*). Les déchets radioactifs sont stockés à la fois par le DOE et par des organismes privés. Les sites de stockage seront à terme placés sous la responsabilité du Gouvernement fédéral ou des gouvernements des États. Les combustibles usés et les déchets de haute activité sont actuellement entreposés.

Les déchets de plusieurs producteurs peuvent ainsi être regroupés avant leur traitement et leur stockage. Les exploitants des installations de stockage conservent les données pendant la durée de vie des installations et organisent l'archivage après fermeture.

Les spécifications des inventaires relèvent des législations de chaque État dans lequel les stockages sont situés ou de l'État fédéral.

L'inventaire doit conserver une trace papier, à partir de sa production et pendant toute la durée du stockage.

La NRC requiert des producteurs de déchets du secteur privé qu'ils établissent des systèmes d'inventaire des déchets détenus sur les sites de stockage.

Pour le secteur de la défense, le DOE (em.doe.gov) possède également ses propres systèmes d'inventaires établis sur les sites et illustrés par les exemples ci-après :

- *Solid Waste Information Tracking System* (SWITS), utilisé pour les déchets solides, FMA et transuraniens, du site de Hanford ;
- *Integrated Waste Tracking System* (IWTS) à l'Idaho National Laboratory ;
- *Waste Isolation Pilot Plant Waste Information Management System* (WWIS) qui constitue l'inventaire (déchets transuraniens) du premier stockage géologique en exploitation.

Souvent très complets, les inventaires américains portent sur toutes les productions à l'origine des déchets radioactifs : déchets miniers, activités d'assainissement de sites et déchets dits mixtes de faible activité, comportant à la fois de la radioactivité et des résidus toxiques chimiques.

Les informations sont généralement librement accessibles sous forme de bases de données à partir d'Internet, en particulier celle du WIPP exploitée par le DOE.

Enfin, le DOE réalise une synthèse des informations d'inventaire des installations nucléaires. Elle est publiée dans le rapport national, adressé à l'AIEA, en application de la Convention commune sur la sûreté de la gestion des combustibles usés et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs. Elle est également mise à jour dans la base de données d'inventaire NEWMDB exploitée par l'AIEA. L'inventaire américain publié dans ce rapport répertorie les déchets selon les classifications respectives du DOE et de la NRC. Il inclut les matières et résidus miniers :

- l'inventaire prévisionnel des combustibles usés est mis à jour annuellement. Les combustibles usés ne sont actuellement pas stockés, mais entreposés dans les installations des producteurs ;
- l'inventaire des déchets radioactifs stockés est publié de façon synthétique et détaillé par secteur (DOE ou NRC). Les déchets entreposés sur les sites de production ne sont pas répertoriés dans cet inventaire. Ils font l'objet d'un inventaire de suivi d'exploitation et de flux établi par les exploitants.

► TABLEAU SYNTHÉTIQUE DES INVENTAIRES DES DÉCHETS RADIOACTIFS PAR SECTEUR ET INSTALLATION (*US 5TH NATIONAL REPORT FOR THE JOINT CONVENTION IAEA, SEPT. 2014*)

Secteur	Type de stockage	Type de déchets	Nombre	Inventaire	Unité
Gouvernement	Stockage géologique (WIPP)	TRU	1	9,10.10 ⁴	m ³
	"Greater Confinement Disposal (boreholes)" au Nevada National Security Site	TRU	1	2,00.10 ²	m ³
	Stockage de surface	LLW	18	1,51.10 ⁷	m ³
				1,25.10 ²	Compartiments réacteur
Commercial	Stockage de surface en exploitation	LLW (Class A, B, C)	4	4,63.10 ⁶	m ³
		AEA Section 11e.(2)	1	1,40.10 ⁶	m ³
	Stockage de surface après fermeture	LLW	4	4,38.10 ⁵	m ³
Gouvernement/ Commercial	Title I UMTRCA Stockage de produits miniers	<i>Residual Radioactive Material (tailings)</i>	22	2,45.10 ⁸	tonnes
Commercial	Title II UMTRCA Stockage de produits miniers	AEA Section 11e.(2)	44		
Gouvernement	Autres cellules de stockage, après fermeture (Weldon Spring Site and Monticello)	<i>Residual Radioactive Material (tailings)</i>	2	3,03.10 ⁶	m ³

CANADA

Le Canada publie tous les trois ans un inventaire qui précise l'emplacement des déchets radioactifs, et dresse un état des productions et des quantités accumulées. Il fournit également

des prévisions des quantités qui seront produites jusqu'à la fin de l'exploitation du parc actuel des réacteurs, envisagée en 2050.

► INVENTAIRE DES DÉCHETS RADIOACTIFS AU CANADA¹

Catégorie	Inventaire à fin 2013	Inventaire à fin 2050
<i>High-level waste (HLW, combustibles usés)</i>	10 021 m ³	20 660 m ³
<i>Intermediate-level waste (ILW)</i>	34 770 m ³	67 738 m ³
<i>Low-level waste (LLW)</i>	2 352 672 m ³	2 499 803 m ³
Résidus de traitement de l'uranium	216 000 000 tonnes	Non disponible

Les données de l'inventaire des déchets radioactifs proviennent de plusieurs sources et en particulier de la Société de gestion des déchets nucléaires SGGD/NWMO en charge de dresser l'inventaire des combustibles usés.

Elles sont tirées des documents réglementaires, des rapports et informations fournis par l'organisme de réglementation, les producteurs de déchets et les installations de gestion des déchets. Les documents réglementaires comprennent les rapports de conformité annuels ou trimestriels, les examens annuels de la sûreté et les rapports de déclassement soumis à l'autorité de sûreté (la CCSN).

Enfin, chaque titulaire d'autorisation doit élaborer et mettre en œuvre un système de comptabilité portant aussi sur les déchets radioactifs et les combustibles usés. Ce système et les registres afférents sont assujettis à une surveillance réglementaire.

Les déchets radioactifs y sont présentés suivant trois catégories qui correspondent aux politiques de gestion de ces déchets mises en œuvre dans ce pays :

- déchets de combustible nucléaire ;
- déchets de faible activité et de moyenne activité ;
- déchets issus de l'extraction minière et de la concentration de l'uranium.

La première catégorie concerne les grappes de combustibles des différents réacteurs de type Candu. La seconde se partage en déchets courants, qui résultent du fonctionnement et du démantèlement des installations, et en déchets historiques issus d'anciennes activités, par exemple de raffinage du radium à Port Hope. Enfin, le Canada répertorie les résidus de traitement de l'uranium sur des sites en opération, inactifs et déclassés.

Le Bureau de gestion des déchets radioactifs de faible activité (LLRWMO, en anglais) réalise l'inventaire. Cette instance, chargée par ailleurs des programmes de gestion des déchets courants et historiques, est administrée par l'organisme de recherche EACL (Énergie atomique du Canada limitée) pour le compte du ministère des Ressources naturelles.

Quatre inventaires ont été publiés entre 2009 et 2012. Une version a été publiée en 2014 par le *Canadian Nuclear Laboratories* (CNL) pour le compte de LLRWMO. Certaines informations de celui-ci sont extraites du cinquième rapport canadien dans le cadre de la Convention commune de l'AIEA.



Le Canada produit des déchets radioactifs depuis le début des années 1930, époque à laquelle la première mine d'uranium est entrée en exploitation à Port Radium, dans les Territoires du Nord-Ouest. Le radium était raffiné à des fins médicales et plus tard, l'uranium a été traité à Port Hope, en Ontario. Les activités de recherche et développement sur l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité ont commencé dans les années 1940, aux Laboratoires de Chalk River (LCR) d'Énergie atomique du Canada limitée (EACL). Aujourd'hui, les déchets radioactifs générés au Canada proviennent des mines et des usines de concentration d'uranium, des raffineries d'uranium et des usines de conversion de l'uranium, de la fabrication de combustible nucléaire, de l'exploitation de réacteurs nucléaires pour la production d'électricité, de la recherche nucléaire, et de la production et de l'utilisation de radio-isotopes.

¹ Source : *Inventory Summary Report*, CNL, 2013.

SUÈDE

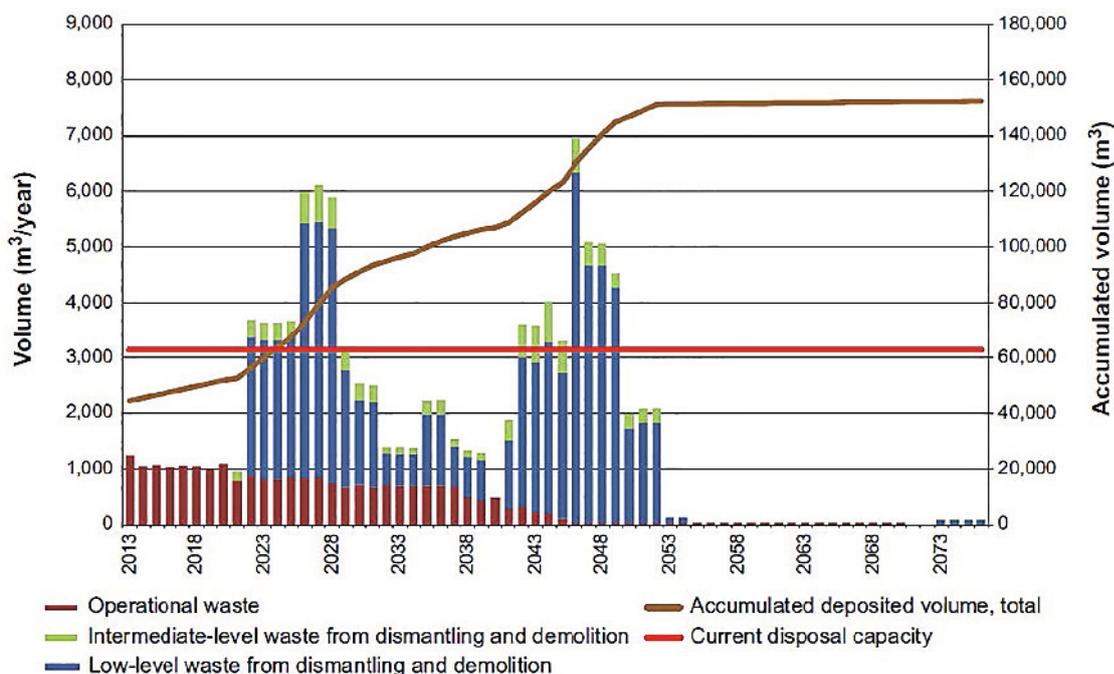


En 2007, lors d'une évaluation des objectifs environnementaux, l'Autorité de radioprotection suédoise de l'époque a conclu que, s'agissant du rayonnement des substances radioactives, la gestion et l'élimination de tous les déchets radioactifs devaient être de la plus haute priorité. Elle a suggéré que le libellé d'un nouvel objectif soit « d'ici 2020, il y aura des solutions pour la gestion et l'élimination sûres de tous les déchets radioactifs. » Pour respecter cet objectif, l'autorité a suggéré qu'un Plan national de gestion de tous les déchets radioactifs devrait être établi.

Le gouvernement a donc missionné l'Autorité de radioprotection suédoise pour l'élaboration du premier Plan suédois de gestion de tous les déchets radioactifs avant le 30 juin 2009.

Ce document, dont l'inventaire n'est qu'une partie de son contenu, a été ensuite remplacé par le rapport national dans le cadre la directive européenne 2011/70/Euratom, en cohérence avec le rapport de la Convention commune de l'AIEA. La dernière version du rapport a été diffusée en 2015.

Il n'y a pas de système de classification des déchets légalement défini en Suède pour les déchets radioactifs. Il existe cependant un système de classification des déchets établi par l'industrie nucléaire en Suède. Ainsi, dans le rapport de 2015, il y a une comparaison entre les différentes classifications suédoises, UE et AIEA. Le schéma de classification utilisé en Suède est basé sur les exutoires existants et futurs (stockages définitifs). Par exemple, le stockage de déchets de type FMA-VC est fait dans des galeries souterraines creusées dans un massif granitique : ce site de stockage, appelé SFR est situé à 50 mètres au-dessous de la Baltique et comprend quatre voûtes rocheuses de 160 mètres de long et une chambre dans le substrat rocheux avec un silo en béton de 50 mètres de haut pour les déchets les plus radioactifs. La figure suivante montre l'évolution des besoins de stockage pour le SFR sachant que la capacité actuelle du stockage SFR est de 63 000 m³ ¹.



Forecast of volumes of short-lived waste operation from dismantling and demolition to SFR. The volume that arises during a year is read on the left-hand axis. The brown curve shows the accumulated volume of waste and is read on the right-hand axis (total about 155,000 m³). Accumulated volume can be compared with current disposal capacity (red line, total 63,000 m³).







LES ANNEXES ET GLOSSAIRE

ANNEXE 01 - MÉTHODOLOGIE D'ÉLABORATION DE L'INVENTAIRE NATIONAL	160
ANNEXE 02 - L'ACTIVITÉ DES DÉCHETS RADIOACTIFS	164
GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS	170

ANNEXE

01

Méthodologie d'élaboration de l'Inventaire national

LES MODALITÉS DE RÉALISATION DE L'INVENTAIRE NATIONAL	161
La réglementation	161
Les principes	162
Les acteurs	163
LA RESTITUTION DES INFORMATIONS	164

LES MODALITÉS DE RÉALISATION DE L'INVENTAIRE NATIONAL

LA RÉGLEMENTATION

L'article L. 542-12 du Code de l'environnement charge l'Andra « d'établir, de mettre à jour tous les trois ans et de publier l'Inventaire des matières et déchets radioactifs présents en France ou destinés à y être stockés ainsi que leur localisation sur le territoire national. »

Les articles R. 542-67 à R. 542-72 du Code de l'environnement et l'arrêté ministériel du 9 octobre 2008¹, modifié par les arrêtés ministériels du 4 avril 2014 et du 16 mars 2017², définissent les obligations déclaratives des producteurs et des détenteurs de matières et de déchets radioactifs.

Pour l'édition 2018 de l'Inventaire national, les stocks de déchets existants sont établis à fin 2016, les prévisions sont établies aux horizons 2030 et 2040 et à terminaison, c'est-à-dire à l'issue du démantèlement des installations nucléaires autorisées à fin 2016.

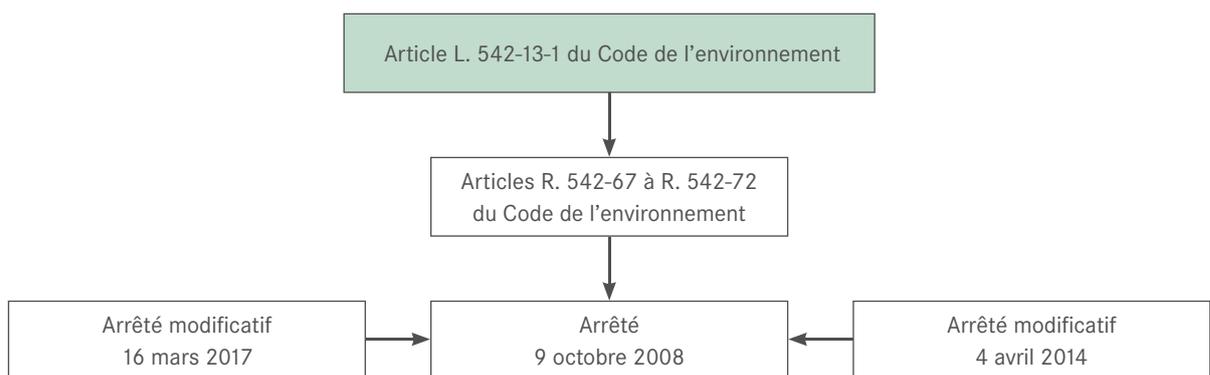
► L'ARTICLE 7 DE L'ARRÊTÉ DU 9 OCTOBRE 2008 MODIFIÉ DÉFINIT LES DATES DE RÉFÉRENCE POUR LA PRÉSENTE ET LES FUTURES ÉDITIONS

Édition	Date des stocks	Dates des prévisions	
2018	31/12/2016	Fin 2030	Fin 2040
2021	31/12/2019	Fin 2030	Fin 2040
2024	31/12/2022	Fin 2030	Fin 2040
2027	31/12/2025	Fin 2040	Fin 2050
2030	31/12/2028	Fin 2040	Fin 2050



*Seuls les déchets issus du fonctionnement et du démantèlement des installations existantes ou autorisées à fin 2016 sont recensés dans l'Inventaire national.
L'exploitation d'une installation nucléaire comprend sa phase de fonctionnement et sa phase de démantèlement.*

► LA RÉGLEMENTATION APPLICABLE À L'INVENTAIRE NATIONAL



1 Arrêté du 9 octobre 2008 relatif à la nature des informations que les responsables d'activités nucléaires et les entreprises mentionnées à l'article L. 1333-10 du Code de la santé publique ont obligation d'établir, de tenir à jour et de transmettre périodiquement à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.
2 Arrêtés du 4 avril 2014 et du 16 mars 2017 modifiant l'arrêté du 9 octobre 2008 relatif à la nature des informations que les responsables d'activités nucléaires et les entreprises mentionnées à l'article L. 1333-10 du Code de la santé publique ont obligation d'établir, de tenir à jour et de transmettre périodiquement à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

LES PRINCIPES

Une méthodologie stricte et des procédures rigoureuses de vérification des données sous-tendent la réalisation de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs.

Plusieurs objectifs sont poursuivis :

- recenser les matières et déchets radioactifs sur le territoire français, y compris les déchets étrangers destinés à retourner chez les clients étrangers, auprès de chaque producteur ou détenteur. L'Andra accomplit ce travail de recensement depuis 1992. Initialement effectué sur la base de la libre déclaration

des producteurs et des détenteurs, ce travail est réalisé depuis 2008 dans le cadre réglementaire décrit au paragraphe précédent ;

- établir une vue synthétique des matières et des déchets radioactifs existants et à venir selon divers scénarios contrastés avec, pour certains d'entre eux, des photographies des stocks aux dates clés définies par arrêté ministériel ainsi qu'à terminaison, c'est-à-dire à l'issue du démantèlement des installations nucléaires.

LES MATIÈRES ET LES DÉCHETS RADIOACTIFS SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS

L'Inventaire national recense l'ensemble des matières et des déchets radioactifs présents sur le territoire français. Il prend donc en compte les matières et les déchets radioactifs provenant du retraitement de combustibles étrangers, bien que ceux-ci soient destinés à repartir dans leur pays d'origine.

Les exploitants d'installations nucléaires effectuant des opérations de retraitement pour le compte de clients étrangers rendent public chaque année un rapport qui recense l'ensemble des matières et des déchets radioactifs appartenant à leurs clients étrangers, conformément à l'article L. 542-2-1 du Code de l'environnement.

Cinq principes directeurs régissent l'élaboration de l'Inventaire national et en garantissent la fiabilité, la qualité et le caractère de référence :

- **la disponibilité de l'information** : une mise en forme des données rendues compréhensibles pour un large public permet de répondre à l'exigence d'information des citoyens. Parallèlement, l'objectif est de mettre à disposition des pouvoirs publics, pour l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), un inventaire réaliste, correspondant à la meilleure vision des producteurs de déchets au moment de leur déclaration ;
- **l'exhaustivité** : l'Inventaire national recense les déchets existants liés aux productions récentes et en cours, mais aussi aux productions du passé depuis le début des utilisations des propriétés de la radioactivité qu'elles soient industrielles, de la défense, médicales ou de la recherche. L'objectif est de présenter une « photographie » de tous les déchets présents sur le territoire français à un instant donné, quel que soit leur état physique ou chimique, conditionnés ou non, liquides ou solides, de radioactivité forte ou faible. Le champ d'investigation du recensement ne se limite pas aux seuls stockages ou aux entreposages des déchets. Il concerne également toutes les installations accueillant, même à titre provisoire, des déchets radioactifs destinés à être pris en charge par l'Andra, par exemple dans les laboratoires de recherche médicale ou universitaire. Il s'étend également aux matières radioactives ;

- **la neutralité** : l'Inventaire national retranscrit les informations recueillies de manière factuelle, sans porter de jugement sur le caractère dangereux ou non des situations et des modes de gestion décrits ;

- **la transparence** : l'Inventaire national présente l'ensemble des matières et des déchets radioactifs, quelle que soit leur origine. Cette approche se veut complémentaire des efforts de transparence engagés depuis plusieurs années par les pouvoirs publics, les producteurs de déchets et l'Autorité de sûreté nucléaire¹.

Pour respecter ce principe, un comité de pilotage (*voir ci-après « Les acteurs »*), présidé par le directeur général de l'Andra et composé de membres extérieurs à l'Agence, pilote l'élaboration de l'Inventaire national ;

- **la responsabilité du déclarant et la vérification par l'Andra de la filière de gestion** : l'Inventaire national présente les données déclarées par les producteurs de déchets. Chaque producteur est donc responsable de sa déclaration. Si nécessaire, l'article R. 542-71 du Code de l'environnement permet à l'Andra de faire appel à l'administration en cas de manquement d'un producteur ou détenteur de déchets à ses obligations déclaratives. Par ailleurs, l'Andra vérifie la pertinence de la filière de gestion du déchet proposée par le producteur. Les obligations déclaratives des producteurs ou des détenteurs de déchets ne dispensent toutefois pas l'Agence de veiller à l'exhaustivité de son recensement en recoupant diverses sources d'information, et notamment

¹ Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire.

en analysant la presse nationale et régionale. Lorsque la présence de déchets radioactifs est avérée sur des sites non encore répertoriés, ils intègrent l'Inventaire national lors de la mise à jour suivante.

La filière de gestion proposée dans l'Inventaire national ne préjuge pas de l'acceptation du déchet dans le centre de stockage correspondant.

L'Inventaire national présente tous les déchets, qu'ils soient ou non déjà conditionnés ; des hypothèses sur les modes de conditionnement sont donc également nécessaires pour quantifier les volumes de déchets. Elles correspondent à la meilleure appréciation que les producteurs possèdent au moment de la déclaration, mais ne préjugent pas toujours du conditionnement qui sera effectivement mis en œuvre.

LES ACTEURS

Les déclarations des producteurs et des détenteurs de déchets sont pour la grande majorité effectuées par Internet depuis 2008. Les procédures de vérification des données déclarées dépendent du type de producteur :

- **les grands industriels du nucléaire** (Andra, Orano, CEA, EDF) qui gèrent plusieurs sites. Chaque site dispose de correspondants qui connaissent précisément l'état des stocks et effectuent les déclarations (les déclarants). Ces déclarations sont ensuite vérifiées puis validées par un responsable au niveau de chaque organisme (le superviseur déclarant). Les prévisions sont directement déclarées par les superviseurs ;
- **les producteurs dits « producteurs non électro-nucléaires »** produisent moins de déchets radioactifs. Chaque responsable d'activité nucléaire effectue directement sa déclaration sans validation par un supérieur.

Chaque donnée déclarée est vérifiée par l'Andra : comparaison avec la déclaration précédente, contrôle de cohérence, recoupements avec d'éventuelles autres sources d'information, analyse de la filière de gestion des déchets retenue par le producteur, etc.

Une fois analysées, les déclarations sont ensuite validées par l'Andra, le cas échéant après échanges avec le producteur et reprise des déclarations ;

- **Le Comité de pilotage** (Copil) de l'Inventaire national a été créé dans un souci de transparence et d'efficacité. Il permet de partager une vision consensuelle de cet inventaire. La principale mission du Copil est de valider les hypothèses nécessaires à la réalisation de l'Inventaire national et les principales conclusions résultant de l'analyse des déclarations avant que celles-ci ne soient rendues publiques. Il doit aussi s'assurer que les informations sont transmises au public dans la plus grande transparence possible.

Par ailleurs, conformément aux prescriptions du PNGMDR 2016-2018, l'Andra présente chaque année, lors d'une réunion du groupe de travail PNGMDR, une actualisation des quantités de matières et de déchets stockés ou entreposés sur la base des déclarations annuelles des producteurs.



Par producteurs non électronucléaires on entend les producteurs ou détenteurs de déchets radioactifs issus du secteur médical, de la recherche (hors CEA) et de l'industrie non électronucléaire. Il s'agit principalement de producteurs relevant de l'article R. 542-68 du Code de l'environnement.

COMPOSITION DU COMITÉ DE PILOTAGE DE L'INVENTAIRE NATIONAL

Ce comité est constitué :

- de représentants des administrations concernées (ministère en charge de l'Environnement et de l'Énergie) ;
- de représentants des Autorités de sûreté nucléaire (ASN, ASND) ;
- de représentants des principaux producteurs de déchets (électronucléaire et non électronucléaire) ;
- d'un représentant de la Commission nationale d'évaluation (CNE), à titre d'observateur ;
- de représentants des associations de la société civile, de défense de l'environnement et des CLI.

LA RESTITUTION DES INFORMATIONS

L'Andra occupe une position privilégiée pour remplir la mission de recensement qui lui est confiée par le Code de l'environnement, du fait de sa connaissance des déchets, des sites producteurs et des filières de gestion. L'information recueillie est corrélée avec les différentes autres sources dont dispose l'Agence.

Ces informations sont restituées, soit en version papier, soit en version Web sur le site inventaire.andra.fr :

- une version papier et Web pour :
 - le présent *rapport de synthèse*,
 - *les Essentiels* ;

- une version Web pour :
 - *L'Inventaire géographique*,
 - *le Catalogue descriptif des familles*,
 - les fichiers en *open data*.

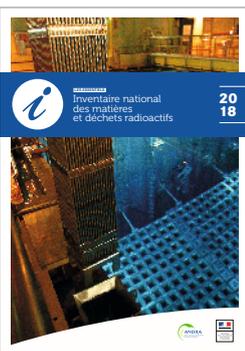
Le nouveau dispositif numérique développé sur le site Internet de l'Inventaire national permet de consulter directement sur le Web le *Catalogue descriptif des familles* et *L'Inventaire géographique*. La mise en place de filtres permet de générer et d'imprimer des documents personnalisés ou l'intégralité des documents proposés.



LE RAPPORT DE SYNTHÈSE

Ce document présente de manière détaillée l'ensemble des matières et des déchets radioactifs, existants et futurs, présent sur le territoire français. Les quantités sont regroupées par catégorie et par secteur économique.

La partie quantitative est complétée par des dossiers thématiques qui permettent de faire un focus sur certains sujets tels que le traitement et le conditionnement des déchets ou le démantèlement et l'assainissement des installations.



LES ESSENTIELS

Le document *Les Essentiels 2018* présente, de manière synthétique, les chiffres globaux de l'Inventaire national 2018.



L'INVENTAIRE GÉOGRAPHIQUE

L'Inventaire géographique est la stricte restitution des déclarations des producteurs. Il présente chaque site par région administrative, département et commune. Il répertorie aussi les centres de stockage de l'Andra, les établissements de la défense nationale, les sites des producteurs non électronucléaires et les sites historiques. Ces sites historiques recouvrent les sites miniers et les sites historiques de stockage.

L'information est reportée de façon factuelle, sous forme de fiches géographiques. Dans ces fiches figurent les informations sur les radionucléides présents, le volume des déchets (lorsque ces informations sont disponibles) ainsi que les filières de gestion.

La catégorie du déchet, comme définie au *chapitre 1*, est précisée ainsi que la famille à laquelle il appartient (décrite dans *le Catalogue descriptif des familles*). Chaque type de déchet présent sur le site est mentionné, associé à son activité et au volume, une fois conditionné.



LE CATALOGUE DESCRIPTIF DES FAMILLES

Le recensement effectué selon les principes précédents conduit à un nombre élevé de déchets déclarés. Les déchets ont été regroupés par famille (une famille se définit comme un ensemble de déchets radioactifs ayant des caractéristiques analogues), par souci de simplification et de présentation. La description détaillée de chaque famille de l'Inventaire national fait l'objet du *Catalogue descriptif des familles* de déchets radioactifs.

Le *catalogue descriptif des familles* présente pour chaque fiche famille les stocks de déchets à fin 2016, en précisant la part sur site producteur ou détenteur et la part stockée dans les centres de l'Andra, l'activité totale des déchets déclarée par les producteurs et détenteurs à la date de l'inventaire (31 décembre 2016), ainsi que les prévisions de production à fin 2030 et à fin 2040.

Ces prévisions se fondent sur le scénario SR1 de renouvellement du parc électronucléaire par des EPR puis RNR avec une durée de fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire actuel comprise entre 50 et 60 ans.

L'INVENTAIRE NATIONAL PEUT-IL PRÉTENDRE À L'EXHAUSTIVITÉ ?

Depuis 1993, grâce aux actualisations successives des recensements, la localisation des déchets et certaines de leurs caractéristiques ont été précisées et complétées dans chaque secteur, les producteurs eux-mêmes progressant dans la connaissance de leurs déchets.

La question de l'exhaustivité se pose à deux niveaux : la localisation des sites sur lesquels se trouvent des déchets radioactifs et les quantités et natures des déchets pour chaque site répertorié.

Un producteur peut oublier un déchet au moment de sa déclaration. Cependant, comme les producteurs les plus importants déclarent également leurs stocks de déchets à l'Autorité de sûreté nucléaire, ce risque d'oubli est limité. Les deux déclarations sont en général comparées par le producteur, ou établies conjointement. De plus, l'Autorité de sûreté nucléaire effectue régulièrement des vérifications sur site, des déclarations qui lui sont faites.

Dans le cas d'Orano, les stocks de déchets sont également audités par un organisme mandaté par ses clients.

Au fil des éditions, certaines installations ne sont plus recensées car elles ne contiennent plus de déchets radioactifs (sites démantelés et assainis). *A contrario*, de nouvelles installations productrices de déchets apparaissent.

Le caractère réglementaire des déclarations, à partir de 2008, a contribué à accroître l'exhaustivité des données déclarées pour la présente édition de l'Inventaire national. Par ailleurs, les incidents sur le site du Tricastin de l'été 2008 ont conduit le ministre de la Transition écologique et solidaire (anciennement ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire) à saisir le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN). À la suite de cette saisine, les informations concernant certains sites historiques présentés dans l'Inventaire national ont été précisées. Toutefois, il peut exister des détenteurs potentiels de déchets radioactifs qui ne se sont jamais adressés à l'Andra.

Enfin, comme développé au *chapitre 01*, la notion même de « déchet radioactif » est sujette à interprétation pour certains déchets présentant des niveaux de radioactivité très bas.

ANNEXE

02

L'activité des déchets radioactifs

LA RADIOACTIVITÉ	167
LES RAYONNEMENTS	167
LE NIVEAU D'ACTIVITÉ ET LA DURÉE DE VIE	167
LA MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ	168
COMMENT MESURE-T-ON L'ACTIVITÉ DES COLIS DE DÉCHETS ?	169

LA RADIOACTIVITÉ

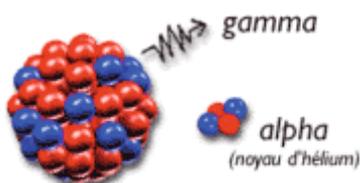
Dans la nature, la plupart des atomes (constituant la matière) ont des noyaux stables. Les autres ont des noyaux instables : ils présentent un excès de particules (protons, neutrons ou les deux) qui les conduit à se transformer (par désintégration) en d'autres noyaux (stables ou non). On dit alors qu'ils sont radioactifs car, en se transformant, ils émettent des rayonnements dont la nature et les propriétés sont variables.



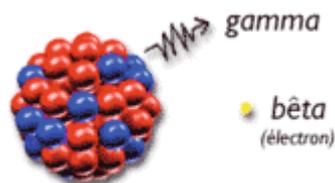
LES RAYONNEMENTS

On distingue trois types de rayonnement, correspondant à trois formes de radioactivité :

- **le rayonnement α** : émission d'un noyau d'hélium (constitué de deux protons et de deux neutrons) appelé aussi « particule α . » La portée dans l'air de ces particules est de quelques centimètres, elles sont arrêtées par une simple feuille de papier ;



- **le rayonnement β** : transformation d'un neutron en proton accompagnée par l'émission d'un électron. Il suffit d'une feuille d'aluminium ou d'une vitre en verre ordinaire pour interrompre le parcours des électrons ;



- **le rayonnement γ** : émission d'un rayonnement électromagnétique, de même nature que la lumière visible ou les rayons X, mais beaucoup plus énergétique et donc plus pénétrant. Plusieurs centimètres de plomb ou plusieurs décimètres de béton sont nécessaires pour les arrêter.

LE NIVEAU D'ACTIVITÉ ET LA DURÉE DE VIE

Les radionucléides sont des atomes radioactifs qui, en se désintégrant, émettent des rayonnements à l'origine du phénomène de la radioactivité. Certains radionucléides sont très radioactifs (plusieurs milliards de milliards de becquerels), d'autres ont une faible activité (qui se mesure en milli-becquerels).

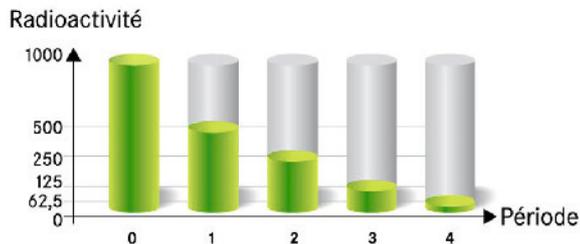
Par ailleurs, la durée de vie des radionucléides (durée pendant laquelle ils émettent des rayonnements) est très variable d'un radionucléide à l'autre. On appelle période radioactive le temps au bout duquel la moitié de la quantité d'un même radionucléide aura naturellement disparu par désintégration. Le niveau de radioactivité d'un échantillon contenant des atomes de ce seul radionucléide est donc divisé par deux au bout d'une période. Au bout de 10 périodes, le niveau de radioactivité est divisé par 1 000.

Cette période peut aller par exemple d'une fraction de seconde pour le polonium 214 à 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238.

La période radioactive d'un radionucléide est systématiquement reliée par une fonction inverse de l'activité : plus la période est longue, plus l'activité est faible. Le tableau suivant donne des exemples d'activités pour 1 gramme d'échantillon (iode 131, césium 137, plutonium 239 et uranium 238).

► EXEMPLES DE RELATION ENTRE PÉRIODE ET ACTIVITÉ

Radioélément	Période	Activité massique
Iode 131	8 jours	4,6 10 ¹⁵ Bq/g
Césium 137	30 ans	3,2 10 ⁹ Bq/g
Plutonium 239	24 113 ans	2,3 10 ⁶ Bq/g
Uranium 238	4,5 milliards d'années	12 400 Bq/g



Courbe de décroissance de la radioactivité : la radioactivité est divisée par quatre après deux périodes, par huit après trois périodes, etc.

En physique nucléaire, l'activité est souvent rapportée à un volume (activité volumique en Bq/L ou Bq/m³), une masse (activité massique en Bq/g) ou une surface (activité surfacique en Bq/m²). L'activité massique d'une substance radioactive est le nombre de désintégrations par unité de temps et par unité de masse. Dans le catalogue des familles, elle s'exprime en becquerels par gramme de colis fini.

LA MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ

Les rayonnements issus de la radioactivité ne sont pas directement perceptibles par nos sens. Nous les mesurons par quantification de leurs effets.

Les méthodes pour y parvenir sont fondées sur le fait qu'un rayonnement laisse une trace au sein de la matière traversée. Les détecteurs couramment utilisés sont de conceptions diverses (compteurs contenant un gaz, scintillateurs, semi-conducteurs), mais ils utilisent tous le même principe : ils convertissent en un signal électrique les photons ou les électrons créés par le rayonnement, pour compter le nombre de désintégrations.

Les unités de mesure de la radioactivité

Le becquerel et le gray sont les unités qui mesurent la radioactivité et son énergie. Le sievert est une grandeur qui en estime les effets.

■ Le becquerel (Bq)

Il permet de mesurer le niveau de radioactivité, également appelé activité. Il correspond au nombre d'atomes qui se désintègrent par unité de temps (seconde).

L'ancienne unité était le curie (Ci) : 1 Ci = 3,7.10¹⁰ Bq, en référence au nom des découvreurs du radium (Pierre et Marie Curie).

■ Le gray (Gy)

Il permet de mesurer la quantité d'énergie absorbée (dose absorbée) par de la matière (organisme ou objet) exposée à des rayonnements ionisants. Un gray correspond à une énergie absorbée de 1 joule par kilo de matière.

L'ancienne unité était le rad : 1 Gy = 100 rad.

■ Le sievert (Sv)

Il permet d'évaluer les effets biologiques des rayonnements d'origine naturelle ou artificielle sur l'homme, en fonction du type de rayonnement.

L'ancienne unité était le rem : 1 Sv = 100 Rem.



Contrôle radiologique : mesure des rayonnements d'un colis de déchets

► PRINCIPALES GRANDEURS MESURÉES

Grandeur mesurée	Définition	Unités
Activité	Nombre de désintégrations par seconde	becquerel (Bq)
Dose absorbée	Quantité d'énergie transférée à la matière	gray (Gy)
Dose efficace	Effets des rayonnements sur l'organisme	sievert (Sv)

Bien que le becquerel soit une unité infiniment faible, les appareils de mesure dont on dispose sont souvent assez sensibles pour déceler la radioactivité dans des conditions optimales. De plus, la radioactivité se mesure sur des appareils portables et en lecture instantanée, sous réserve que l'appareil utilisé soit adapté aux rayonnements réellement présents.

COMMENT MESURE-T-ON L'ACTIVITÉ DES COLIS DE DÉCHETS ?

Chaque désintégration est accompagnée de l'émission de rayonnement (gamma) ou de particules (alpha, bêta, neutron). Leur énergie étant représentative du noyau qui s'est désintégré, la mesure de ces rayonnements (intensité et énergie) par des instruments adaptés et correctement calibrés permet d'évaluer l'activité d'un déchet et de quantifier les différents radionucléides.

Les mesures sont effectuées par spectrométries sur colis et/ou sur échantillons.

Certains radionucléides sont cependant difficilement mesurables du fait de leur faible quantité et/ou de leur rayonnement peu énergétique. Des facteurs de corrélation sont alors établis entre l'activité de ces radionucléides et celle d'un radionucléide plus facilement mesurable utilisé comme traceur.

La répartition des activités des différents radionucléides dans le déchet (spectre radiologique) est ainsi évaluée.

Le producteur évalue, le plus souvent, l'activité du déchet lors de sa production ou de son conditionnement.

GLOSSAIRE ET ABRÉVIATIONS

	Termes	Définitions
A	Actinide	Radioélément naturel ou artificiel, de numéro atomique compris entre 89 (actinium) et 103 (lawrencium). Certains auteurs font commencer la série des actinides à l'élément 90 (thorium).
	Actinide mineur	Terme d'usage désignant le neptunium, l'américium ou le curium formé dans les combustibles nucléaires.
	Activité	Nombre de désintégrations ou de transitions isomériques nucléaires qui se produisent par unité de temps, dans une substance radioactive. L'unité d'activité est le becquerel.
	AIEA (IAEA en anglais)	Agence internationale pour l'énergie nucléaire (iaea.org).
	Amont du cycle du combustible	Ensemble des opérations du cycle du combustible depuis l'exploitation minière jusqu'à la fabrication du combustible.
	Assainissement radioactif	Pour une installation ou un site nucléaire, ensemble d'opérations visant à éliminer ou réduire la radioactivité, notamment par décontamination ou évacuation de matériels, en permettant la récupération contrôlée des substances radioactives. Terme équivalent à « dépollution » dans le domaine des pollutions par des substances radioactives.
	Assemblage combustible	Groupement d'éléments combustibles qui restent solidaires, notamment au cours du chargement ou du déchargement du cœur d'un réacteur nucléaire.
B	Aval du cycle du combustible	Ensemble des opérations du cycle du combustible postérieures au séjour de ce dernier en réacteur, depuis le retraitement éventuel des combustibles usés jusqu'au stockage des déchets radioactifs.
	Baddeleyite	La baddeleyite est un minéral naturel rare d'oxyde de zirconium (ZrO ₂).
	Becquerel (Bq)	Unité du système international (SI) de mesure de l'activité. C'est l'activité d'une quantité de nucléides radioactifs pour laquelle le nombre moyen de désintégrations ou de transitions isomériques nucléaires par seconde est égal à 1 (1 Bq = 1 s ⁻¹). Cette unité remplace le curie (1 Ci = 3,7.10 ¹⁰ Bq). On emploie plus couramment ses multiples : le mégabecquerel (MBq, million de becquerels, 10 ⁶ Bq), le gigabecquerel (GBq, milliard, 10 ⁹ Bq), le térabecquerel (TBq, mille milliards, 10 ¹² Bq), le pétabecquerel (PBq, million de milliards, 10 ¹⁵ Bq) ou l'exabecquerel (EBq, milliard de milliards, 10 ¹⁸ Bq).
	Boues bitumées	Boues issues d'une opération de coprécipitation dans les stations de traitement des effluents radioactifs liquides et conditionnées dans du bitume.
C	Boîte à gants	Une boîte à gants est une enceinte de confinement isolant complètement un procédé par une paroi transparente (matériaux spéciaux qui filtrent une partie du rayonnement). Des gants sont installés dans la paroi pour permettre les manipulations de matières radioactives en toute sécurité. Le dispositif comprend en général une ventilation mettant la boîte en dépression par rapport à l'extérieur, ce qui permet de confiner les matières radioactives au sein de celle-ci.
	Centre de stockage de déchets radioactifs	Installation destinée à recevoir de manière durable des déchets radioactifs. En fonction des risques radiologiques des déchets, des installations à la surface du sol, à faible profondeur ou en formation géologique profonde sont envisageables.
	Cigéo	Centre industriel de stockage géologique.
	Cires	Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage.
	CNE	Commission nationale d'évaluation.
	Colis de blocs sources	Ces colis de catégorie MA-VL contiennent des sources scellées usagées collectées auprès des « petits producteurs. » Les déchets ont été conditionnés en colis de béton entre 1972 et 1985, en vue de leur stockage. Ils ont ensuite été reconditionnés dans des conteneurs en acier non allié et entreposés à Cadarache en 1994.
	Colis de déchets radioactifs	Déchets radioactifs conditionnés et emballés.

Termes	Définitions
Colis de stockage	Récipient complémentaire dans lequel peuvent être disposés un ou plusieurs colis de déchets radioactifs en vue de leur stockage dans une installation spécifique. Ce conditionnement complémentaire est nécessaire afin d'assurer des fonctions de manutention, de sûreté ou de récupérabilité.
Combustible (nucléaire)	Matière contenant des nucléides dont la consommation par fission dans un réacteur nucléaire permet d'y entretenir une réaction nucléaire en chaîne.
Combustible MOX	Combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium. Le MOX utilisé dans les centrales REP est constitué d'uranium appauvri et de plutonium dont la teneur moyenne en est de 8,65 % et pourrait atteindre 9,5 %.
Combustible RNR	Combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium des réacteurs à neutrons rapides Phénix et Superphénix. Les combustibles du réacteur Superphénix sont constitués d'environ 80 % d'uranium (naturel ou appauvri) et de 20 % de plutonium.
Combustible UNE	Combustible à l'uranium naturel enrichi à base d'oxyde d'uranium. La teneur en uranium naturel enrichi peut varier de 3,25 % à 4,5 % et le taux de combustion moyen peut varier de 33 GWj/t à 55 GWj/t.
Combustible URE	Combustibles composés d'uranium de retraitement.
Combustible utilisé	Combustible nucléaire, déchargé d'un réacteur après irradiation.
Conditionnement des déchets radioactifs	Ensemble des opérations consistant à mettre les déchets radioactifs sous une forme convenant à leur transport, leur entreposage ou leur stockage. <i>Note : ces opérations peuvent comprendre notamment l'enrobage, la vitrification, la cimentation, le bitumage et la mise en conteneur.</i>
C	
Confinement (de matières radioactives)	Maintien de matières radioactives à l'intérieur d'un espace déterminé grâce à un ensemble de dispositifs (ou barrières) visant à empêcher leur dispersion en quantités inacceptables au-delà de cet espace.
Contamination (radioactive)	Présence indésirable de substances radioactives à la surface ou à l'intérieur d'un milieu quelconque.
Conteneur	Dans l'industrie nucléaire, récipient fermé manutentionnable utilisé pour des opérations de transport, d'entreposage ou de stockage.
Coques et embouts	Déchets radioactifs comprenant les coques et les embouts des assemblages après découpe des crayons et dissolution du combustible.
Crayon de combustible	Tube de faible diamètre, fermé à ses deux extrémités, contenant les pastilles de combustible.
CSA	Centre de stockage de l'Aube pour les déchets FMA-VC.
CSD-C	Conteneur standard de déchets compactés.
CSD-V	Conteneur standard de déchets vitrifiés.
CSM	Centre de stockage de la Manche. Le CSM est, selon la nouvelle terminologie applicable aux INB, en phase de fermeture (anciennement dénommée phase de surveillance, phase préparatoire et préfigurant formellement la fermeture et le début de la surveillance, qui interviendra une fois la totalité des aménagements de la couverture achevée) depuis janvier 2003 (décret 2003-30 du 10 janvier 2003), bien que cette situation se soit pratiquement initiée en 1997 après la fin des travaux de couverture.

	Termes	Définitions
D	Déchets à vie courte	Déchets radioactifs dont les composants radioactifs principaux sont des radionucléides dont la période radioactive est inférieure ou égale à 31 ans.
	Déchets à vie longue	Déchets radioactifs contenant en quantité importante des radionucléides dont la période radioactive est supérieure à 31 ans.
	Déchets à radioactivité naturelle élevée	Les déchets à radioactivité naturelle élevée sont des déchets générés par l'utilisation ou la transformation de matières premières contenant naturellement des radionucléides, mais qui ne sont pas utilisées pour leurs propriétés radioactives. Ces déchets peuvent nécessiter une gestion particulière.
	Déchets d'exploitation	Les déchets d'exploitation sont les déchets produits lors du fonctionnement ou du démantèlement d'une installation.
	Déchets de structure	Déchets radioactifs comprenant les structures métalliques des assemblages combustibles des réacteurs à eau. Ce terme peut aussi s'employer pour les assemblages combustibles des réacteurs rapides à sodium.
	Déchets de graphite	En France, catégorie de déchets radioactifs comprenant les éléments en graphite (chemises et briques d'empilement) issus de l'exploitation et du démantèlement des anciens réacteurs UNGG (soit environ 20 000 tonnes). Ce graphite contient du tritium et des éléments à vie longue (carbone 14, chlore 36).
	Déchets radioactifs	Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée. 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.
	Déchets tritiés	Déchets radioactifs, contenant du tritium, pouvant nécessiter une gestion spécifique compte tenu de la grande mobilité de cet élément.
	Déchets vitrifiés	Dans le domaine nucléaire, déchets radioactifs conditionnés en utilisant du verre comme matrice de conditionnement. Les solutions de produits de fission ont été les premiers déchets vitrifiés. Il est envisagé que d'autres déchets moins radioactifs soient vitrifiés à l'avenir.
	Démantèlement	Ensemble des opérations techniques exécutées pour démonter et, éventuellement, mettre au rebut un équipement ou une partie d'une installation nucléaire. Dans la réglementation française, phase de la déconstruction d'une installation nucléaire qui comprend toutes les opérations postérieures au décret de mise à l'arrêt définitif.
	Détenteur de déchets radioactifs	Producteur de déchets ou toute autre personne qui se trouve en possession de déchets (article L. 541-1-1 du Code de l'environnement).
E	Entreposage (de matières ou de déchets radioactifs)	Opération qui consiste à placer provisoirement des matières ou des déchets radioactifs dans une installation spécialement aménagée à cet effet, dans l'attente de les récupérer.
F	FA-VL	Les déchets de faible activité à vie longue sont essentiellement des déchets de graphite provenant des réacteurs UNGG et des déchets radifères. Les déchets de graphite ont, en ordre de grandeur, une activité se situant entre 10 000 et quelques centaines de milliers de becquerels par gramme. Les déchets radifères possèdent une activité comprise entre quelques dizaines de becquerels par gramme et quelques milliers de becquerels par gramme.
	Fissile	Se dit d'un noyau qui peut subir une fission par interaction avec des neutrons de toute énergie, notamment des neutrons thermiques. Les noyaux de la série des actinides ayant des nombres de neutrons impairs sont soit fissiles (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , etc.) soit émetteurs à vie courte (^{237}U , ^{243}Pu , ^{244}Am , etc.). Pour ces derniers, la probabilité de fission induite par neutrons est négligeable même à haut flux. Se dit d'une substance qui contient un ou des nucléides fissiles. On parle alors de matière fissile.
	Fission nucléaire	Désintégration d'un noyau lourd par division généralement en deux noyaux de masse atomique comprise entre 70 et 170.

	Termes	Définitions
H	FMA-VC	Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte sont essentiellement issus de l'exploitation et du démantèlement des centrales nucléaires, des installations du cycle du combustible, des centres de recherche et, pour une faible partie, des activités de recherche biomédicale. L'activité de ces déchets se situe entre quelques centaines de becquerels par gramme à un million de becquerels par gramme.
	HA	Les déchets de haute activité sont principalement issus des combustibles usés après retraitement. Le niveau d'activité de ces déchets est de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme.
	HCTISN	Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire.
I	ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement.
	Installation nucléaire de base (INB)	En France, c'est une installation nucléaire qui, par sa nature et ses caractéristiques ou en raison des quantités ou des activités de toutes les substances radioactives qu'elle contient, est soumise à une réglementation spécifique.
	Installation nucléaire de base Secrète (INBS)	Une Installation nucléaire de base secrète (INBS) est un périmètre géographique comprenant au moins une installation nucléaire de base qui intéresse la défense et qui justifie d'une protection particulière contre la prolifération nucléaire, la malveillance ou la divulgation d'informations classifiées. L'ensemble des installations et des équipements, nucléaires ou non, compris dans le périmètre susmentionné fait partie de l'INBS. Les installations nucléaires comprises dans l'INBS sont appelées « installations individuelles de l'INBS. » Le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection des INBS relève de l'Autorité de sûreté nucléaire de défense, placée sous l'autorité du Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et les installations intéressant la défense (DSND). L'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ASND) définit la réglementation en matière de sécurité nucléaire des INBS de façon cohérente et coordonnée avec celle définie par l'Autorité de sûreté nucléaire. Comme cette dernière, elle est indépendante des exploitants nucléaires.
	ISD	Installation de stockage de déchets conventionnels.
	Isotope	Tout nucléide d'un élément donné. Qualifie des nucléides d'un même élément.
M	MA-VL	Les déchets de moyenne activité à vie longue sont en majorité issus du retraitement des combustibles usés. L'activité de ces déchets est de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme.
	Marqué (site)	Site présentant des traces de radionucléides naturels ou artificiels, détectables sans qu'il y ait nécessairement d'action particulière envisagée.
	Matière radioactive	Une matière radioactive est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement.
	Matrice (de conditionnement)	Matériau solide utilisé pour immobiliser ou pour confiner les déchets radioactifs ou simplement pour améliorer la résistance à l'écrasement du colis de déchets.
	MES	Matières en suspension, résidus issus du traitement des terres rares contenant du thorium.
	Métal lourd	Dans le domaine du combustible nucléaire, ensemble des actinides. En pratique, cette expression concerne essentiellement l'uranium, le plutonium et le thorium.
	Modérateur	Matériau formé de noyaux légers qui ralentissent les neutrons par diffusion élastique. Utilisé dans les réacteurs nucléaires à neutrons lents afin d'augmenter la probabilité d'interaction des neutrons avec les noyaux lourds du combustible, le modérateur doit être peu capturant afin de ne pas « gaspiller » les neutrons et être suffisamment dense pour assurer un ralentissement efficace.
	Métastable	État dans lequel un noyau atomique est « bloqué » dans un état excité (à un niveau d'énergie supérieur à son état fondamental) pendant un certain laps de temps, de quelques milliardièmes de seconde à plusieurs milliards d'années.

	Termes	Définitions	
N	Nucléide	Espèce nucléaire caractérisée par son numéro atomique Z et par son nombre de masse A, égal au nombre de nucléons de son noyau. Chaque élément chimique possède en général plusieurs nucléides isotopes. On désigne un nucléide par son symbole chimique précédé de son nombre de masse A en exposant et de son numéro atomique Z en indice, par exemple $^{238}_{92}\text{U}$.	
	OPECST	Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.	
O	Période radioactive (ou demi-vie)	Temps au bout duquel la moitié de la quantité d'un même radionucléide aura naturellement disparu par désintégration. Le niveau de radioactivité d'un échantillon d'un même atome est donc divisé par deux. Au bout de 10 périodes, le niveau de radioactivité est divisé par 1 000.	
	Phosphogypse	Le phosphogypse est le précipité solide de sulfate de calcium hydraté, produit pour la fabrication de l'acide phosphorique et des engrais phosphatés lors du traitement des minerais de fluorophosphates de calcium.	
	Plutonium	Élément de numéro atomique Z = 94. Il a été produit initialement pour les applications militaires. Généré dans les réacteurs nucléaires par irradiation à partir de l'uranium 238, il est utilisé aujourd'hui comme constituant des combustibles MOX dans certains réacteurs à eau légère. C'est aussi le combustible retenu dans la plupart des études de réacteurs à neutrons rapides.	
	PNGMDR	Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs.	
	Pollué (site)	Dans le contexte de la contamination radioactive, qualifie une zone ou un site contaminé de manière importante par des substances radioactives, naturelles ou artificielles.	
	P	Pollution radioactive	Introduction, directe ou indirecte, par l'activité humaine, de substances radioactives dans l'environnement, susceptibles de contribuer ou de causer un danger pour la santé de l'homme, des détériorations aux ressources biologiques, aux écosystèmes ou aux biens matériels, une entrave à un usage légitime de l'environnement. Une pollution historique est une pollution qui résulte d'une activité humaine passée. Une pollution résiduelle concerne une quantité ou une concentration de polluants restant dans un milieu déterminé après réhabilitation.
		Producteur (de déchets)	Toute personne dont l'activité produit des déchets (producteur initial de déchets) ou toute personne qui effectue des opérations de traitement des déchets conduisant à un changement de la nature ou de la composition de ces déchets (producteur subséquent de déchets) (article L. 541-1-1 du Code de l'environnement).
Produit d'activation		Les produits d'activation sont des nucléides formés par irradiation neutronique d'un matériau.	
Produit de fission		Les produits de fission sont des nucléides résultant de la fission d'un élément (un noyau) fissile : chaque noyau de matière fissile subissant une fission nucléaire se casse en deux (exceptionnellement trois) morceaux, qui se stabilisent sous forme de nouveaux atomes. En sortie de réacteur nucléaire, la plupart (environ 95 % en masse) des produits de fission sont stables (environ 85 %) ou radioactifs à vie courte (environ 10 %). Quelques-uns (environ 5 %), par exemple ^{99}Tc , ^{129}I sont à vie longue.	
Radioactivité		Propriété d'un nucléide de se transformer spontanément en un autre nucléide, avec émission d'un rayonnement (particules, rayons X, rayons gamma, etc.), ou d'être le siège d'une fission spontanée accompagnée d'une émission de particules et de gammas. Outre la fission spontanée, on distingue principalement la radioactivité alpha, la radioactivité bêta (β^+ , β^- , conversion interne), la radioactivité gamma et celle provenant d'une capture électronique. La radioactivité gamma accompagne souvent l'une des autres.	
R	Radioélément	Élément chimique dont tous les isotopes sont radioactifs. Terme d'emploi déconseillé parfois utilisé pour radioisotope ou radionucléide.	
	Radionucléide/ Radioisotope	Atomes radioactifs qui, en se désintégrant, émettent des rayonnements à l'origine du phénomène de la radioactivité.	
	Radioprotection	Ensemble des mesures destinées à réaliser la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les effets des rayonnements ionisants et à assurer le respect des normes de base. Elle comprend aussi la mise en œuvre des moyens nécessaires pour y parvenir.	

	Termes	Définitions
R	RCD	Les déchets de reprise et conditionnement des déchets (RCD) sont des déchets historiques qui n'ont pas été conditionnés en ligne lors de leur production et qui sont ou seront repris par leur détenteur pour conditionnement et stockage.
	Réacteurs à eau pressurisée (REP)	Synonyme de réacteur à eau sous pression. Réacteur à neutrons thermiques utilisant l'eau légère comme modérateur et caloporteur. Cette eau est maintenue liquide dans le cœur grâce à une pression suffisamment élevée pour que à la température de fonctionnement, l'ébullition en masse ne puisse pas se produire.
	Réacteurs à neutrons rapides	Réacteur nucléaire dans lequel on limite la présence de matières pouvant ralentir les neutrons afin que les fissions soient produites principalement par des neutrons rapides.
	Réacteur uranium naturel graphite gaz (UNGG)	Réacteur nucléaire à fission de première génération utilisant l'uranium naturel comme combustible, le graphite comme modérateur et le dioxyde de carbone gazeux comme fluide caloporteur.
	Réhabilitation	Ensemble des opérations de dépollution et de réaménagement effectuées en vue de rendre un site apte à un usage donné.
	Retraitement des combustibles usés	Ensemble des opérations effectuées sur le combustible usé issu des réacteurs nucléaires pour en extraire des matières valorisables comme l'uranium et le plutonium et conditionner les déchets restants. Le retraitement peut aussi être envisagé pour séparer d'autres éléments.
S	Scénario	Ensemble d'hypothèses relatives à des événements ou des comportements permettant de décrire les évolutions possibles d'un système dans le temps et dans l'espace.
	SIENID	Sites et installations d'expérimentations nucléaires intéressant la défense.
	Source radioactive	Appareil, substance radioactive ou installation pouvant émettre des rayonnements ionisants ou des substances radioactives.
	Stockage de déchets radioactifs	Le stockage de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon durablement définitive dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement.
	Substance radioactive	Une substance radioactive est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection.
T	Taux de combustion	Énergie totale libérée par unité de masse d'un combustible nucléaire. Il est couramment exprimé en gigawatts-jour par tonne de métal lourd (GWj/t).
	Terre rare	Élément d'un groupe contenant les lanthanides et deux éléments chimiquement voisins, l'yttrium et le scandium.
	TFA	Les déchets de très faible activité sont majoritairement issus de l'exploitation de maintenance et du démantèlement des centrales nucléaires, des installations du cycle du combustible et des centres de recherche. Le niveau d'activité de ces déchets est en général inférieur à 100 becquerels par gramme.
	tML	Tonnes de métal lourd.
	Toxique chimique	Substance ou élément chimique susceptible d'induire des effets néfastes sur la santé humaine en cas d'ingestion et/ou d'inhalation. L'impact d'un toxique chimique sur la santé humaine est notamment quantifié par sa valeur toxicologique de référence (VTR) qui est une appellation générique regroupant tous les types d'indices toxicologiques qui permettent d'établir une relation entre une dose et un effet (dans le cas d'un toxique à seuil d'effet), ou entre une dose et une probabilité d'effet (dans le cas d'un toxique sans seuil d'effet, souvent cancérigène). Plusieurs éléments ou substances utilisés dans le domaine nucléaire ou présents dans les produits de fission présentent une toxicité radioactive. Pour le stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde, sont notamment pris en compte dans les études l'arsenic, le cadmium, le cyanure, le chrome, le mercure, le nickel, le plomb, l'antimoine, le sélénium, le bore, l'uranium, le béryllium et l'amiante.
	Traitement d'un déchet	Ensemble d'opérations mécaniques, physiques ou chimiques ayant pour but de modifier les caractéristiques des déchets.

	Termes	Définitions
T	Tritium	Isotope de l'hydrogène de nombre masse égal à 3. C'est un émetteur bêta de faible énergie (en moyenne 13 KeV) et d'une période de 12,3 ans. Il est utilisé dans de nombreuses molécules marquées. Les projets actuels d'application de la fusion nucléaire font tous appel à la réaction deutérium-tritium. Dans les applications industrielles civiles actuelles, c'est surtout un déchet radioactif, qui nécessite une gestion particulière en raison de sa grande mobilité.
U	Uranium de retraitement (URT)	Uranium issu du retraitement des combustibles usés.
	Uranium de retraitement enrichi (URE)	Uranium enrichi provenant de l'enrichissement d'uranium issu du retraitement des combustibles usés.
V	Volume équivalent conditionné	L'unité adoptée pour effectuer les bilans est le « volume équivalent conditionné. » Cela permet d'utiliser une unité de compte homogène pour l'ensemble des déchets. Les prévisions adoptent, elles aussi, le « volume équivalent conditionné » comme unité. Pour les déchets dont le conditionnement n'est pas connu à ce jour, des hypothèses sont faites pour évaluer le volume équivalent conditionné. Pour le stockage profond, un conditionnement complémentaire appelé colis de stockage est nécessaire afin d'assurer des fonctions de manutention, de sûreté ou de récupérabilité. Seul le volume primaire est indiqué dans le présent document.
	Volume industriel	Volume d'eau déplacé par immersion du colis.
Z	Zircon	Minéral naturel du groupe des silicates ($ZrSiO_4$).

Photo de couverture : Contrôle radiologique d'un colis de déchets FMA à son arrivée sur le Centre de stockage de l'Aube.

Crédits photos : A. Da Silva, P. Demail, V. Duterme, N. Guillaumey, C. Helsly, D. Junker, E. Larrayadiou, S. Lavoué, W. Maria Weber, P. Masson, P. Maurein, Moulins, S. Muzerelle, D. Queyrel, F. Vigouroux, M. Saint-Louis, Wlad 074, D.R.

Photothèques : Andra, ARC-Nucléart, Bipan, CEA, EDF, Fotolia, Graphix images, Institut Curie, Medisystem, Musée Curie (Coll. ACJC), National Institutes of Health-United States Department of Health and Human Services-U.S. federal government, Okénite animation, Orano, Polka.



Où sont-ils ?

Combien
y en a-t-il
aujourd'hui ?

Combien
y en aura-t-il
demain ?

Toutes les données sur les matières
et déchets radioactifs sont sur
inventaire.andra.fr