

LA CARACTÉRISATION DES COLIS DE DÉCHETS RADIOACTIFS

RÉSUMÉ

► GÉNÉRALITÉS

Toutes les installations nucléaires génèrent en exploitation puis lors de leur démantèlement des déchets radioactifs (ou "nucléaires"), de natures très variées. Ces déchets sont traités et conditionnés de façon sûre sous forme de colis de stockage via des filières de gestion permettant leur stockage définitif dans des installations dédiées.

Tous les colis doivent respecter des spécifications liées aux exigences de sûreté du stockage concerné. Ceci impose aux producteurs de déchets de réaliser, quelle que soit la catégorie du déchet (TFA, FMA-VC, MA-VL, HA) une **caractérisation radiologique de chaque colis de déchet**, en préalable à son évacuation (ou à son entreposage temporaire). L'évaluation de l'activité radiologique des déchets est ainsi une exigence des Autorités de Sûreté Nucléaire (ASNR et ASND) vis-à-vis des installations qui les génèrent.

► PROCESSUS DE CARACTÉRISATION

Les actions de caractérisation consistent en premier lieu à définir l'inventaire des radionucléides présents dans les locaux et donc dans les futurs déchets. Cet inventaire (appelé spectre radiologique) est réalisé en amont de la production des déchets, ce qui permet de définir la catégorie des déchets et d'identifier les exigences radiologiques de la filière à respecter. Le spectre radiologique est constitué de l'ensemble des radionucléides susceptibles d'être présents dans les déchets.

Les déchets préconditionnés font systématiquement l'objet d'une mesure physique afin d'évaluer l'activité des radionucléides. Grâce à la connaissance du spectre radiologique préalablement établi, il est alors possible de déterminer l'activité radiologique de tous les radionucléides et de vérifier le respect des exigences de stockage pour la filière définie.

Les méthodes de mesure physiques sont :

- **Mesure du débit de dose délivré par le colis** : principalement utilisée pour les déchets issus des réacteurs ou les déchets TFA voire FMA-VC issus des installations du cycle du combustible.
- **Spectrométrie gamma** : pour les déchets dont le spectre radiologique est constitué d'un mélange de radionucléides émetteurs bêta gamma et émetteurs alpha. Cette technique est utilisée dans les installations du cycle du combustible et lors des opérations de démantèlement ou de reprise des déchets anciens.
- **Mesures neutroniques passives et actives** : pour les déchets contenant des émetteurs alpha. Celles-ci viennent compléter la spectrométrie gamma et permettent de quantifier les masses de matières nucléaires.

La caractérisation radiologique des déchets est nécessaire pour garantir qu'aucun déchet ne soit évacué vers un stockage dont il ne respecte pas les exigences de sûreté.

Les coûts relatifs à la caractérisation ne constituent qu'une part minime de l'ensemble des coûts de gestion des déchets radioactifs et par ailleurs, la connaissance précise de ces caractéristiques permet d'évacuer les colis vers le stockage définitif le plus approprié, ce qui induit potentiellement des économies conséquentes.

1. PRÉAMBULE

Si elle est trop restrictive, elle créera une entrave inutile à l'usage industriel et médical de la radioactivité ; si elle est trop laxiste, elle pourrait permettre des dommages sanitaires qui auraient pu être évités. Y a-t-il oui ou non un seuil au-dessous duquel les effets de la radioactivité ne sont pas décelables ?

Toutes les installations nucléaires génèrent, lors de leur exploitation puis lors de leur démantèlement, des déchets radioactifs (ou "déchets nucléaires"), de natures très variées. Ces déchets sont traités via des filières de gestion aboutissant à leur stockage définitif et sûr dans des installations dédiées à cet usage.

Ces installations de stockage, surveillées par l'ASNR, définissent des exigences sur les colis de déchets entrants. Ces exigences imposent notamment aux producteurs de réaliser une **caractérisation radiologique de chaque colis de déchets**, en préalable à son évacuation.

L'évaluation de l'activité radiologique des déchets est donc une exigence des Autorités de Sûreté Nucléaire (ASNR* et ASND*) vis-à-vis des installations qui les génèrent. La présente fiche présente les actions de caractérisation radiologique mises en œuvre lors du processus de conditionnement des déchets radioactifs afin de fournir à l'Andra l'ensemble des données radiologiques exigées.

Remarques préliminaires :

- les termes suivis d'un astérisque (*) sont explicités dans le glossaire en fin de document ;
- dans le présent document, sauf précision contraire, le terme "déchets" désigne des déchets radioactifs.

2. RAPPELS SUR LA RADIOACTIVITÉ

Toutes les installations nucléaires génèrent, lors de leur exploitation puis lors de leur démantèlement, des déchets radioactifs, de natures très variées. Ces déchets sont traités via des filières de gestion aboutissant à leur stockage définitif et sûr dans des installations dédiées à cet usage.

La notion de radioactivité et les grandeurs physiques associées sont détaillées dans l'Article GAENA N°9 "La radioactivité c'est naturel" et l'Article GAENA N° 15 "En connaître un rayon" (réf. [1], [2]). Nous rappelons ci-dessous rapidement les notions utiles dans le cadre de la gestion des déchets radioactifs.

Certains atomes instables - appelés radionucléides* ou "RN" - cherchent à se stabiliser en émettant différents types de rayonnements : alpha α , bêta β , gamma γ , neutrons. À chaque RN correspondent plusieurs rayonnements, caractérisés par leurs énergies d'émission.

Un objet ou une substance contenant des RN est dit "radioactif".

Chaque RN est caractérisé par sa demi-vie* de décroissance radioactive (ou "période radioactive"), durant laquelle il perd la moitié de sa radioactivité. Cette demi-vie peut varier considérablement d'un RN à l'autre, comme le montre le tableau 1 ci-dessous.

Radionucléide	Symbole	Type d'émission	Demi-vie radioactive
Iode 131	^{131}I	β -, γ	8 jours
Cobalt 60	^{60}Co	β -, γ	5,3 ans
Strontium 90	^{90}Sr	β -	29 ans
Césium 137	^{137}Cs	β -, γ	30 ans
Américium 241	^{241}Am	α , γ , X	432 ans
Carbone 14	^{14}C	β -	5 730 ans
Technétium 99	^{99}Tc	β -	21 200 ans
Plutonium 239	^{239}Pu	α	24 000 ans

Nota : Le nombre associé à chaque RN correspond au nombre de neutrons + protons dans son noyau.

Tableau 1 : Exemples de RadioNucléides

Le Becquerel* (Bq) est l'unité de mesure de l'activité* (nombre de désintégrations par seconde) d'une quantité de substance radioactive. Cette activité est la somme des activités de chaque RN présent. Elle est souvent rapportée à la masse (Bq/g ou Bq/kg), au volume (Bq/l ou Bq/m³) ou à la surface (Bq/m²) de la substance radioactive concernée.

La radioactivité s'exprime le plus souvent en multiples du Becquerel. La radioactivité naturelle est de l'ordre de quelques dizaines à quelques milliers de Bq/kg, comme le montrent les exemples ci-dessous (réf. [3]) :

- Eau de mer : 10 Bq/l
- Lait : 50 à 80 Bq/l
- Corps humain : 90 Bq/kg
- Sol granitique : $8 \cdot 10^3$ Bq/kg

3. LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Les déchets radioactifs sont présentés dans la [Fiche Argumentaire GAENA "Les déchets radioactifs"](#) (réf.[4]). Nous rappelons ci-dessous rapidement les notions utiles dans le cadre de la caractérisation des déchets radioactifs, objet de la présente fiche. **Les substances ou objets, dont aucun usage ultérieur n'est envisagé, potentiellement contaminés* par des RN sont appelés déchets radioactifs* (ou déchets radioactifs)*.**

Nota : La grande majorité des déchets radioactifs est constituée d'objets usuels : outils, vêtements de travail, ferrailles, plastiques...

3.1. LE CADRE RÉGLEMENTAIRE

Les déchets radioactifs font l'objet d'un ensemble de règles de gestion : notamment lois et décrets dont découlent les prescriptions des autorités de sûreté (cf. réf. [4]) et les spécifications de stockage de l'Andra.

Ces règles visent à garantir l'innocuité des déchets pour l'homme (travailleur ou public), sans limite dans le temps.

Elles sont mises en œuvre par les acteurs principaux suivants :

- **L'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)** est l'autorité administrative indépendante dont une des missions, au nom de l'État, est le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection. Elle contrôle les producteurs de déchets et l'Andra dans leurs activités nucléaires. L'Autorité de sûreté nucléaire défense (ASND) a la même fonction pour les activités et installations intéressant la défense.
- **L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra)** est chargée de la gestion à long terme des déchets radioactifs français. Ses missions industrielles consistent à 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, et d'exploiter les centres de stockage de déchets radioactifs de façon sûre pour la santé et l'environnement.
- **Les producteurs de déchets** sont responsables de la bonne gestion de leurs déchets avant leur évacuation vers les centres de stockage exploités par l'Andra. 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 leur quantité et leur nocivité. Ils conditionnent les déchets selon les exigences définies par la réglementation. Ils assurent l'entreposage des déchets radioactifs* pour lesquels il n'existe pas de stockage à ce jour.

3.2. LES CATÉGORIES DE DÉCHETS RADIOACTIFS ET LES FILIÈRES CORRESPONDANTES

Les catégories de déchets radioactifs (voir tableau 2) sont définies par la réglementation, en fonction des critères suivants :

- L'activité de l'ensemble des RN présents
- La demi-vie radioactive de ces RN.

À chaque catégorie correspond une filière de gestion*, dont la finalité est le stockage définitif des déchets.

Les installations de stockage sont conçues et exploitées par l'Andra, sous la surveillance de l'ASNR. Pour les déchets qui relèvent d'un stockage en cours d'exploitation (Cires* ou CSA*) ou en projet (Cigeo*), l'Andra émet des **spécifications d'acceptation** qui détaillent les exigences portant sur les caractéristiques physiques, chimiques et radiologiques des colis de déchets* à stocker.

Ces spécifications sont applicables à tous les producteurs de déchets radioactifs, et portent, dans le cas des critères radiologiques, sur des valeurs d'activité massique (en Bq/g) à ne pas dépasser par colis de déchets :

- Déchets très faiblement radioactifs (TFA) : < 100 Bq/g
- Déchets faiblement radioactifs (FA) : de 100 Bq /g à 10⁶ Bq/g
- Déchets de moyenne activité (MA) : de 10⁶ Bq/g à 10⁹ Bq/g
- Déchets de haute activité (HA) : > 10⁹ Bq/g

CATÉGORIE	Déchets à vie très courte contenant des radionucléides* de période < 100 jours	Déchets à vie courte dont la radioactivité provient principalement des radionucléides de période ≤ 31 ans	Déchets à vie longue contenant majoritairement des radionucléides de période > 31 ans
Très faible activité (TFA)	VTC Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis élimination dans les filières dédiées aux déchets conventionnels	TFA Recyclage ou stockage* dédié en surface (installation de stockage du centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage de l'Aube – Cires)	
Faible activité (FA)		FMA-VC Stockage de surface (centre de stockage des déchets de l'Aube – CSA)	FA-VL Stockage à faible profondeur (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)
Moyenne activité (MA)			
Haute activité (HA)	Non applicable ⁽³⁾	MA-VL Stockage en couche géologique profonde (Demande d'autorisation en cours d'instruction) HA	

Tableau 2 : Les catégories de déchets radioactifs (réf [5])

La spécification radiologique associée à chaque stockage impose au producteur de réaliser une caractérisation précise et fiable de tout déchet radioactif qu'il produit, quelle que soit sa catégorie. C'est l'évaluation de l'activité d'un colis de déchets qui permet l'orientation vers la bonne filière.

Les déchets pour lesquels il n'existe pas encore de stockage en exploitation (FA-VL, MA-VL et HA) font l'objet, après caractérisation, d'un entreposage de longue durée dans des installations dédiées, en attente de leur stockage. Par ailleurs, certains déchets font l'objet de traitements (incinération, fusion, etc.). Ces installations, d'entreposage ou de traitement, émettent des spécifications d'acceptation *a minima* aussi contraignantes que celles des installations de stockage auxquelles ces déchets sont destinés.

Nota - Valorisation des déchets métalliques : Depuis 2022, la réglementation permet d'autoriser de façon dérogatoire, la valorisation, après fusion et décontamination, de substances métalliques faiblement ou très faiblement radioactives. La demande de dérogation est déposée auprès du ministre chargé de la radioprotection.

Elle est accompagnée d'un dossier permettant d'établir qu'il s'agit d'une opération de valorisation. La dérogation est accordée par arrêté du ministre chargé de la radioprotection, après consultation du public et avis de l'ASNR. Les produits résultant de l'opération de valorisation ne sont plus considérés comme des substances radioactives, donc ne justifient plus de contrôles de radioprotection.

Les diffuseurs de l'usine Eurodif (140 000 T) et les générateurs de vapeur du parc EDF (130 000 T) pourraient constituer les principales sources de déchets métalliques valorisables.

4. LE PROCESSUS DE TRAITEMENT

4.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROCESSUS

Les modalités de gestion d'un déchet nucléaire (traitement, conditionnement, entreposage, stockage) et les règles associées dépendent de ses caractéristiques physiques, chimiques et radiologiques. Lors du processus de traitement/conditionnement (quelque soit la catégorie du déchet : TFA, FMA-VC, MA-VL, HA), le producteur de déchets doit mettre en œuvre les gestes nécessaires pour garantir le respect des spécifications Andra.

Les spécifications radiologiques précisent, entre autres, les limites d'activité acceptables par RN.

Les caractéristiques radiologiques identifiées sont mesurées et enregistrées tout au long du processus de traitement /conditionnement représenté en figure 1 ci-dessous.

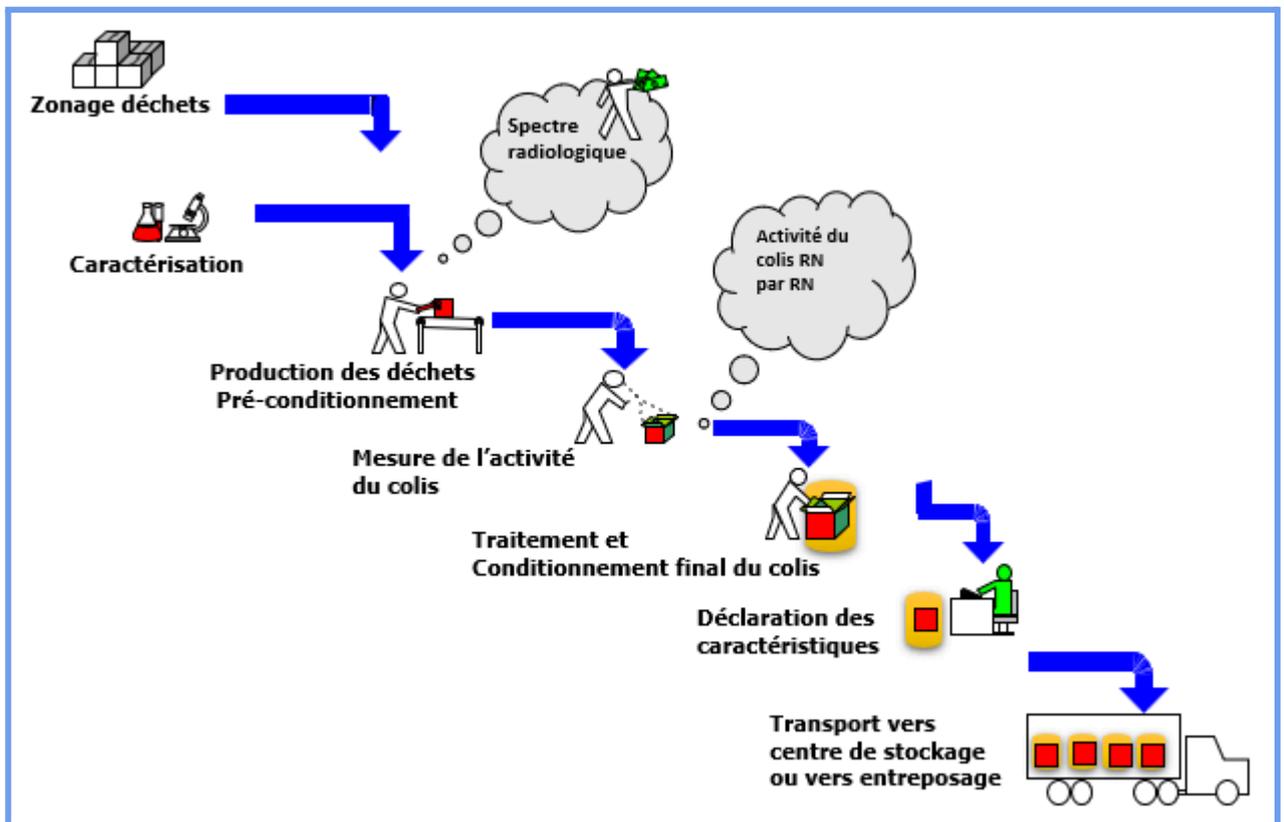


Figure 1 : Synoptique des opérations de gestion des déchets radioactifs

4.2. LE ZONAGE DÉCHETS DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Par les activités qui y sont menées, une installation nucléaire produit des déchets radioactifs et des déchets conventionnels (non radioactifs).



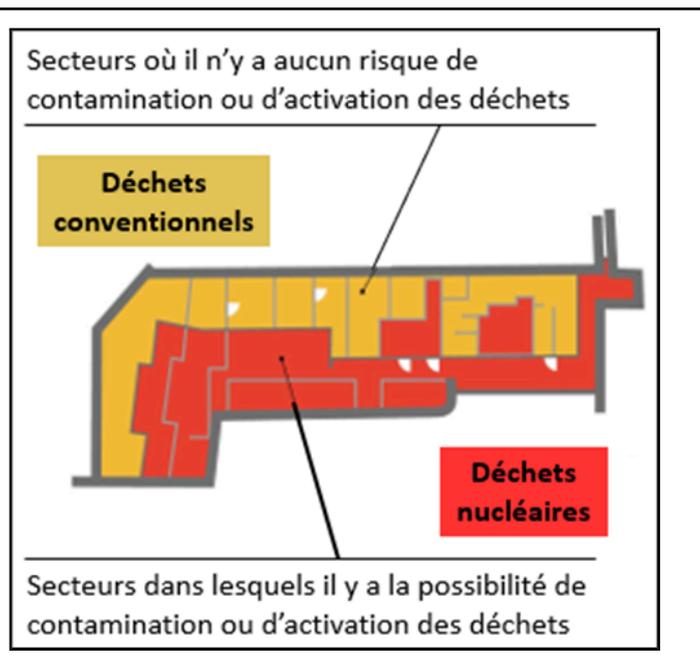
Afin d'identifier la nature des déchets dès leur production, l'ASNR demande à chaque installation nucléaire d'établir son zonage déchets* qui consiste en un découpage géographique des locaux, afin de distinguer :

- Les zones à déchets conventionnels : production de déchets conventionnels, traités dans les filières conventionnelles
- Les zones à déchets nucléaires : production de déchets radioactifs, traités dans les filières de déchets radioactifs.

Sont considérés comme déchets radioactifs tous les déchets provenant des zones à déchets nucléaires, qu'ils soient effectivement contaminés ou non.

La figure 2 ci-contre présente le principe du zonage (réf. [6]) :

Figure 2 : Zonage des déchets dans une installation nucléaire ►



4.3. CARACTÉRISATION – LES SPECTRES RADIOLOGIQUES

Pour répondre aux spécifications de l'Andra, l'activité de chacun des RN susceptibles d'être contenus dans un déchet radioactif doit faire l'objet d'une évaluation.



Caractérisation

Cette évaluation s'appuie principalement sur :

- la connaissance de la contamination radiologique du périmètre où les déchets doivent être produits. C'est le « spectre radiologique* déchet » qui traduit cette connaissance : il dresse un inventaire complet des RN susceptibles d'être présents dans les déchets à produire,
- les résultats de mesures physiques dites "directes" sur les colis, permettant d'acquérir des informations sur les RN directement mesurables.

Il est indispensable de déterminer le spectre radiologique en amont de la production des déchets, quelle que soit leur catégorie.

Le spectre radiologique est établi à partir de prélèvements d'échantillons réalisés dans le périmètre concerné préalablement défini. Ces échantillons sont analysés dans des laboratoires maîtrisant les techniques d'analyses permettant d'accéder à l'activité de chaque RN. L'ensemble des résultats d'analyses permet de créer le spectre radiologique complet. Ce spectre est établi en % d'activité (voir tableau 3) ; il distingue d'une part les RN émetteurs bêta et d'autre part les RN émetteurs alpha. Le rapport de l'activité totale alpha sur l'activité totale bêta est également calculé.

Le spectre établi, ainsi que les activités mesurées dans les échantillons, permettent au producteur de définir au préalable la filière de gestion.

Le spectre est attribué à tous les déchets produits dans le périmètre concerné. Il est établi avant toute production de déchets, et reste valable durant plusieurs années. Il peut être mis à jour en tant que de besoin pour tenir compte des décroissances radioactives des différents RN. Un exemple de spectre radiologique est fourni ci-dessous.

Radionucléide	Part bêta en %	Radionucléide	Part alpha en %
^{60}Co	0,11 %	^{238}Pu	10,64 %
^{63}Ni	0.000151 %	^{239}Pu	16,59 %
^{90}Sr	27.38 %	^{240}Pu	19,94 %
^{99}Tc	0.0279 %	^{241}Pu	0,001 %
^{125}Sb	0.46 %	^{242}Pu	0,02 %
^{137}Cs	71,82 %	^{241}Am	52,09 %
^{154}Eu	0,17 %	^{244}Cm	0,70 %
^{155}Eu	0,032 %	^{242}Cm	0,01 %
Total bêta	100,00 %	Total alpha	100,00 %

Tableau 3 : Exemple de spectre radiologique

Un spectre radiologique comprend :

- Les **Les RN directement mesurables**, c'est à dire qui émettent un rayonnement directement mesurable sur le colis par les techniques non intrusives de spectrométrie gamma,; de comptage neutronique passif ou du débit de dose* gamma : Co, Cs, Ru, Eu, Am...
- Corps Les RN non directement (ou difficilement) mesurables par les techniques de mesure non destructives citées ci-dessus, mais mesurées en laboratoire : ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{63}Ni ...

Afin de pouvoir calculer l'activité totale lors des mesures directes qui seront réalisées ultérieurement sur les colis, les activités des RN non mesurables sont déduites, par ratios, de l'activité d'un RN mesurable systématiquement présent en quantité importante (^{60}Co et/ou ^{137}Cs). Ce RN est appelé RN traceur*. Dans le spectre en exemple ci-dessus, les ratios sont : $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs} = 0.381$, $^{99}\text{Tc}/^{137}\text{Cs} = 3.9.10^{-4}$, $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co} = 2.10.10^{-6}$. L' ^{241}Am est parfois utilisé comme traceur des RN émetteurs alpha.

4.4. LE PRÉCONDITIONNEMENT DES DÉCHETS

Dès leur production, les déchets sont préconditionnés* dans des emballages adaptés à la filière envisagée, et constituent des colis primaires* (GRVS*, fûts, paniers, caissons métalliques, ... voir figure 3). Le spectre du périmètre de production est associé au colis primaire.



Figure 3 : Exemples d'emballages de pré-conditionnement : panier grillagé, GRVS, fûts, caisson métallique

4.5. MESURE DE L'ACTIVITÉ DES COLIS

Après le pré-conditionnement, les colis primaires font l'objet d'une mesure physique visant à déterminer l'activité qu'ils contiennent. **Les méthodes et techniques associées à cette mesure sont détaillées au § 5.**



4.6. CONDITIONNEMENT FINAL DU COLIS

Suite à la mesure, les colis primaires font si besoin l'objet de traitements par leur producteur ou par l'Andra qui visent à les rendre compatibles avec les exigences de stockage.



Ces exigences sont par exemple, le compactage, le reconditionnement dans des emballages dont les dimensions sont spécifiées par l'Andra, l'immobilisation par un mortier dans l'emballage définitif (voir figures 4, 5, 6). Les colis prêts à être stockés sont appelés colis de stockage*.

◀ **Figure 4 : Maquette découpée de fûts de déchets compactés et immobilisés par du mortier**

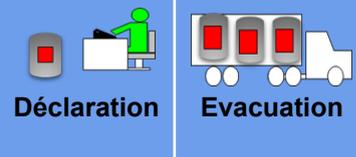
Figure 5 : Fût en coque béton fibres cylindrique ▶



Figure 6 : Exemples de colis de déchets FMA-VC en cours de traitement ou prêts à être expédiés : déchets vinylés en caisson 5 m³ standard, 5 fûts en caisson 5 m³ pré-bétonné, déchets en conteneur béton fibre cubique 5 m³.

4.7. DÉCLARATION ET ÉVACUATION

Les activités de chaque RN doivent être déclarées, lorsque celles-ci sont supérieures aux seuils de déclaration* définis dans la spécification radiologique de la filière considérée.



Une fois terminé, le colis est pesé : la valeur de sa masse est nécessaire pour le calcul définitif des activités massiques en Bq/g. Le producteur a la responsabilité de vérifier que ces valeurs sont conformes à la spécification d'acceptation Andra ou entreposage.

Le colis est alors évacué vers l'Andra (ou l'installation d'entreposage temporaire). L'ensemble des caractéristiques radiologiques identifiées est fourni à l'installation destinataire.

Nota : Les activités radiologiques déclarées permettent de tenir à jour des inventaires radiologiques. L'andra publie périodiquement un "Inventaire national des matières et déchets radioactifs".

5. TECHNIQUES DE MESURE D'ACTIVITÉ DES COLIS

5.1. PRINCIPE DE MESURE

Chaque colis primaire fait l'objet d'une mesure d'activité, quelle que soit sa catégorie.

Il existe des colis cylindriques, parallélépipédiques et des déchets conditionnés sous forme de paquets vinylés. La forme d'emballage la mieux-adaptée à la mesure est le cylindre (fût de 100 L, 200 L, 500 L). La mesure est réalisée à distance pendant que le fût est mis en rotation, afin de prendre en compte l'hétérogénéité de remplissage de celui-ci.

Pour les colis parallélépipédiques, les faces sont mesurées l'une après l'autre.

Pour des colis de gros volume, il est possible de réaliser la mesure sur chaque composant d'un colis (paquets vinylés, fûts...). L'activité contenue dans le colis est alors égale à la somme des activités des composants.



Figure 7 : Exemples de mesure d'activité sur colis

Le système de mesure radiologique (voir exemples en figure 7) permet, pour chaque colis :

- d'identifier des RN présents,
- de calculer les activités pour chaque RN détecté,
- de calculer l'activité totale à l'aide du spectre,
- de calculer les activités massiques du colis,
- de calculer l'Indice Radiologique d'Acceptation en Stockage (IRAS*) pour les colis destinés au Cires.
- de comparer les activités aux exigences Andra mentionnées dans la spécification radiologique de stockage,
- de confirmer sa caractérisation.

Un système de mesure peut être constitué d'un simple radiamètre, d'un (ou plusieurs) spectromètre(s) gamma, de dispositifs de comptage neutronique : ces techniques sont présentées en § 5.3 à § 5.5 ci-dessous.

Incertitudes de mesure

Comme pour toute mesure physique, des incertitudes sont associées aux mesures d'activité : une mesure est toujours donnée avec un "écart-type" qui représente cette incertitude. Dans le domaine de la radioactivité, où les phénomènes sont statistiques et les conditions de mesure parfois difficiles (environnement contraint, hétérogénéité de remplissage du colis, auto-adsorption des rayonnements par les déchets, etc.), cette incertitude peut parfois être élevée. Elle est en général fournie par le système de mesure.

Les spécifications d'acceptation en stockage mentionnent le plus souvent que les valeurs déclarées doivent être des valeurs "Toutes Incertitudes Comprises" (TIC).

Etalonnage et exploitation des chaînes de mesure

Pour les déchets en fûts, une méthode d'étalonnage consiste à soumettre une série de fûts "étalons" aux détecteurs. Chacun de ces fûts étalon est muni en son intérieur d'un dispositif mécanique permettant de positionner une source radioactive test (d'activité précisément connue) à différentes distances de l'axe vertical du fût. Chaque fût est rempli d'un matériau défini (plastiques, métaux, etc.) représentatif des déchets. Pour chaque matériau, la mesure du fût étalon (mis en rotation) avec différentes configurations de la source test permet d'étalonner la réponse du détecteur, et les incertitudes associées, pour des fûts de déchets contenant ce matériau. Ces différentes configurations permettent de prendre en compte au mieux l'hétérogénéité (contenu et répartition) des colis de déchets effectivement mesurés, en fonction de l'estimation des matériaux qu'ils contiennent et de leur taux de remplissage.

Les systèmes de mesures font l'objet de contrôles et d'essais périodiques afin de prévenir les dérives liées au matériel. Ces contrôles incluent l'étalonnage périodique, le contrôle du bruit de fond, le contrôle de bon fonctionnement.

Nota : Evaluation de l'activité des colis HA

En raison de leur débit de dose très élevé, les colis de verres ne font pas l'objet d'une mesure directe. Avant incorporation dans la fritte de verre, le mélange de produits de fission et d'actinides fait l'objet d'une prise d'échantillon puis d'analyses en laboratoire, qui permettent de définir la composition radiologique ainsi que l'activité massique du mélange. L'activité de chaque colis de verre est ensuite calculée en fonction de la masse de produits de fission et d'actinides incorporée (de l'ordre de 14 %) dans la fritte de verre.

5.2. MESURE DU DÉBIT DE DOSE DÉLIVRÉ PAR LE COLIS

La mesure du débit de dose* est une technique de mesure nucléaire permettant d'évaluer la quantité globale de rayonnement gamma émis par le colis. Elle est utilisée quand on sait quel(s) RN est(sont) responsable(s) du débit de dose reçu sur le détecteur. Elle peut être réalisée à l'aide d'un des appareils suivants : radiamètre, compteur proportionnel, compteur Geiger-Müller, au contact ou à distance du colis (voir exemple en figure 8).

À partir du débit de dose mesuré, la fonction de transfert (Ft), établie pour chaque RN responsable du débit de dose, permet la conversion du débit de dose (en mGray*/h) en activités (en Bq). L'utilisation du spectre radiologique permet alors d'obtenir l'activité associée à chaque RN. Pour utiliser cette méthode, il est donc important d'avoir une très bonne connaissance du spectre radiologique.

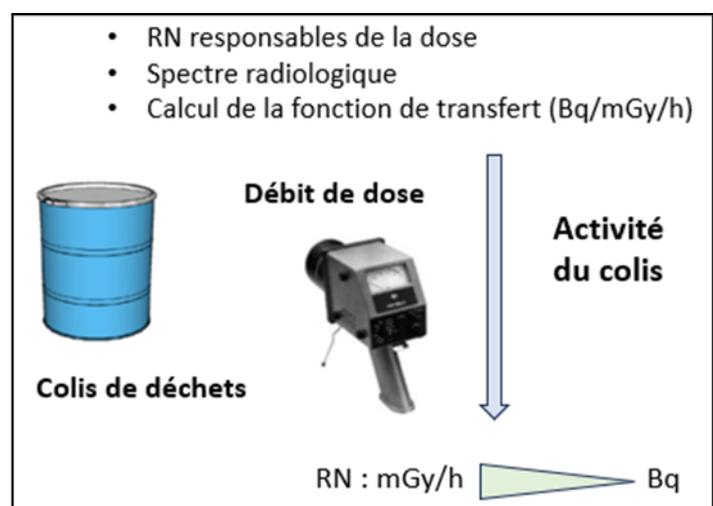


Figure 8 : Mesure du débit de dose délivré par un colis

Cette méthode simple et peu coûteuse est particulièrement adaptée aux déchets issus des réacteurs, dont la composante majoritaire est le ^{60}Co .

5.3. MESURE DE L'ACTIVITÉ DU COLIS PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA

La spectrométrie gamma est une technique de mesure nucléaire permettant d'identifier certains RN par la mesure de l'énergie des rayonnements gamma qu'ils émettent (réf. [7]). Elle diffère des mesures de débit de dose, qui détectent la présence de rayonnements gamma sans fournir d'information sur les RN détectés.

Du fait de son caractère non destructif et de la richesse des informations fournies, cette technique est largement utilisée dans le cadre du démantèlement d'installations nucléaires.

La mesure par spectrométrie gamma permet de construire des spectres en énergie, donnant les quantités de rayonnements gamma détectés en fonction de leur énergie. La position de ces pics d'énergie et leur hauteur sont caractéristiques des RN mesurables présents et des activités associées.

Pour cela, une chaîne de mesure par spectrométrie gamma se compose généralement des équipements suivants (voir figure 9) :

- Un détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur ou d'un scintillateur, qui convertit chaque rayonnement reçu en une impulsion électrique, ou "signal". Certains détecteurs sont refroidis à très basse température par azote liquide, afin de ne pas générer de "bruit" électronique.
- Une électronique et des applications informatiques qui traitent ce signal et permettent son affichage.
- Un support (éventuellement tournant, et muni des automatismes associés) sur lequel est placé le colis à mesurer.

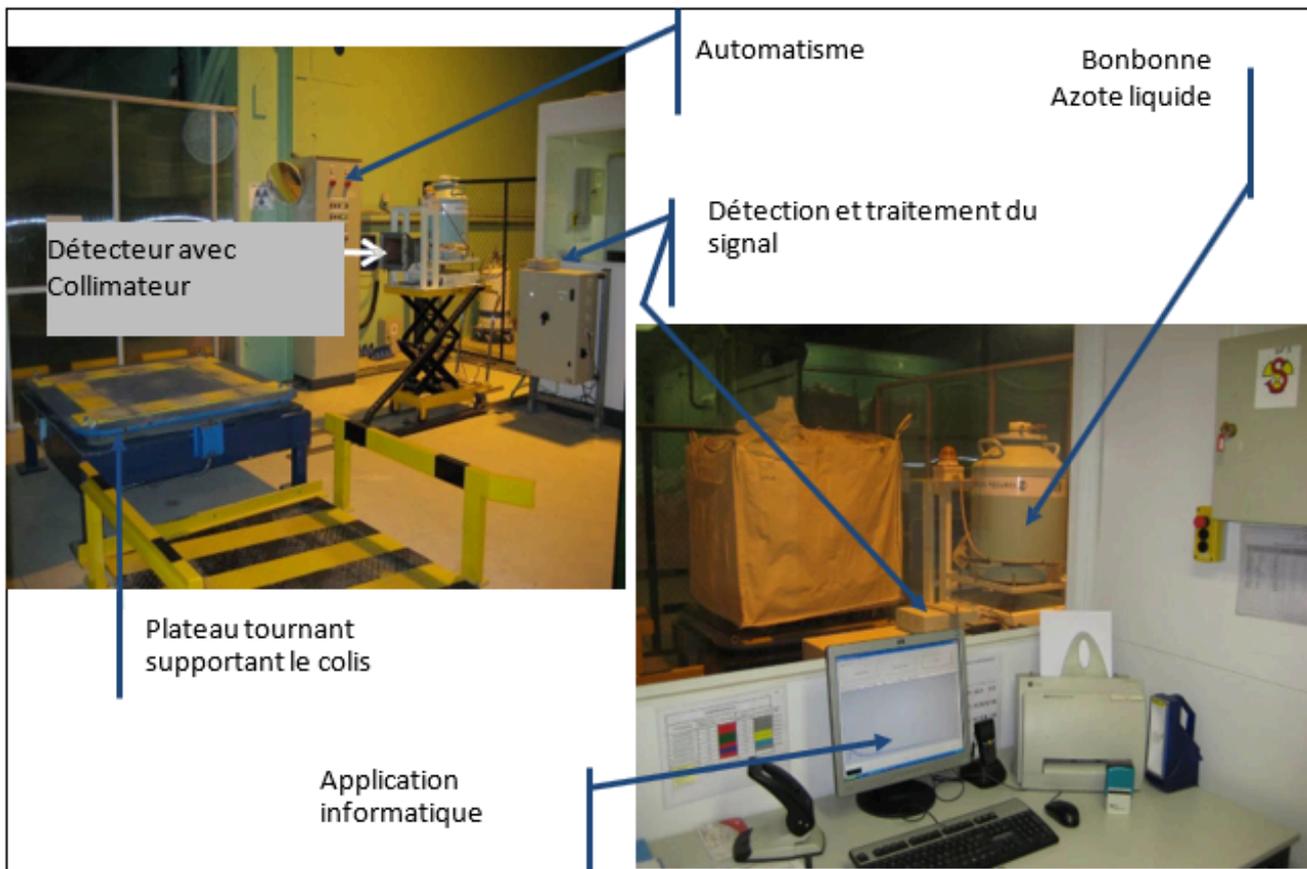


Figure 9 : Chaîne de mesure par spectrométrie gamma

Un détecteur couramment utilisé est le semi-conducteur GeHP* refroidi à l'azote liquide, tel que présenté ci-dessus. Pour les très faibles activités (TFA), on utilise le plus souvent des détecteurs de type scintillateur NaI, peu précis en énergie mais faciles à mettre en œuvre pour des colis de grand volume.

Pour les hautes activités, la spectrométrie gamma a été améliorée par le développement des électroniques numériques de traitement du signal et de petits détecteurs à base de cristaux de CdZnTe.

À l'issue de la mesure d'un colis, un spectre gamma en énergie est obtenu (en keV*). Ce spectre présente généralement plusieurs pics dont certains sont représentatifs de l'activité radiologique des RN traceurs émetteurs gamma (^{137}Cs , ^{60}Co) (voir figure 10).

Après le traitement des données de la spectrométrie et l'utilisation du spectre, on obtient la liste des RN présents et l'activité associée à chaque RN.

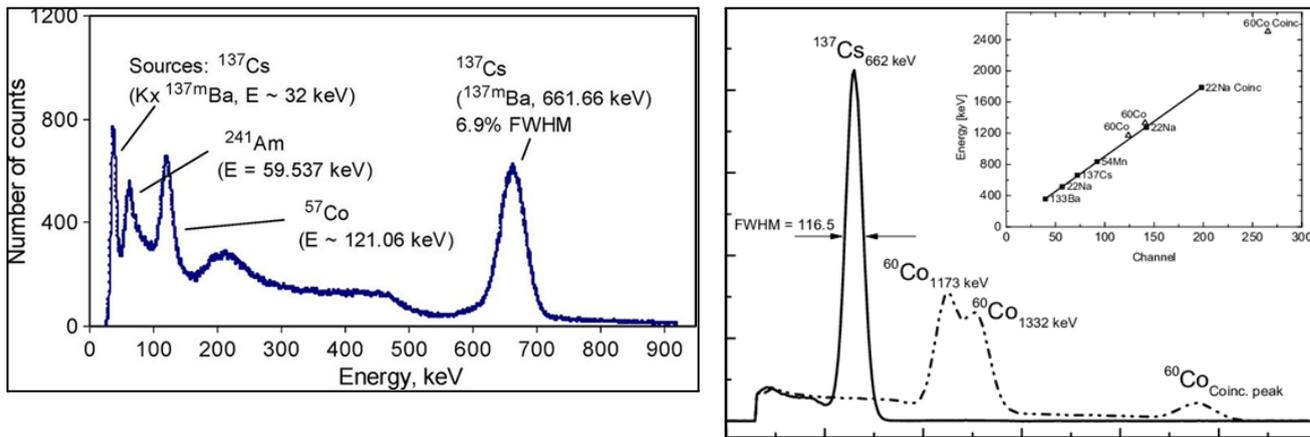


Figure 10 : Exemples de spectre gamma en énergie

5.4. MESURE DE L'ACTIVITÉ DU COLIS PAR COMPTAGE NEUTRONIQUE PASSIF

Certains déchets contiennent de la matière nucléaire constituée d'actinides : principalement ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am et parfois ^{242}Cm et ^{244}Cm . La spectrométrie gamma peut se révéler insuffisamment précise pour mesurer ces actinides, qui émettent des rayonnements gamma de faible énergie. Or, les spécifications d'acceptation en stockage imposent des limites sur les quantités de matières nucléaires, il est donc nécessaire de compléter la spectrométrie par un comptage neutronique passif afin de disposer d'une mesure la plus précise possible.

Les actinides émettent des neutrons, selon 2 processus :

- par "fission spontanée" : le noyau fissionne de lui-même (sans apport initial d'un neutron) et émet simultanément 2 ou 3 neutrons.
NB : Les fissions spontanées concernent essentiellement les isotopes pairs (nombre de neutrons + protons) : ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , et parfois ^{242}Cm et ^{244}Cm
- par "réaction (alpha, neutron)" : une particule alpha issue d'un autre noyau vient percuter le RN, et cette réaction donne lieu à l'émission d'un neutron
NB : Les fissions spontanées concernent essentiellement les isotopes pairs (nombre de neutrons + protons) : ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , et parfois ^{242}Cm et ^{244}Cm

Le comptage neutronique passif permet d'évaluer la quantité de matière nucléaire présente, en évaluant le nombre de fissions spontanées. Pour cela, les chaînes de mesure utilisent en général les coïncidences, qui permettent de ne compter que les neutrons émis par 2 ou 3, et non les neutrons uniques issus de réactions (alpha, neutron). Voir exemples de chaînes de comptage neutronique passif en figure 11.

Pour des raisons techniques, les comptages neutroniques obtenus ne permettent pas d'identifier les isotopes spécifiques à l'origine de l'émission des neutrons. À défaut de pouvoir discriminer les quantités de matière de chacun des RN émetteurs neutroniques, le résultat est donc exprimé sous forme d'une "masse équivalente en ^{240}Pu ". L'analyse combinée des données issues du comptage neutronique, de la spectrométrie gamma et du spectre radiologique (notamment la composition isotopique U, Pu) permet d'obtenir l'activité de chaque actinide.



Figure 11 : à gauche : poste de comptage neutronique pour le démantèlement de l'Usine de Pierrelatte ; à droite : poste de comptage neutronique des fûts de 100 L pour le démantèlement de l'installation PÉGASE à Cadarache. (réf [8]).

Nota : Le comptage neutronique passif est utilisé de manière industrielle depuis des décennies pour la caractérisation des colis de déchets, sur des gammes s'étendant de 0,1 mg à plusieurs kg d'actinides. La plupart de ces applications sont dédiées à la caractérisation d'objets de volume limité (< 1 m³ typiquement).

5.5. MESURE DE L'ACTIVITÉ DU COLIS PAR INTERROGATION NEUTRONIQUE ACTIVE

L'interrogation neutronique active (INA) repose sur la détection des neutrons émis par les déchets suite à une fission induite par une source extérieure de neutrons. Elle permet essentiellement de caractériser les noyaux fissiles* (U 235, Pu 239 et Pu 241), difficilement accessibles par le comptage neutronique passif.

Les actinides soumis à une source extérieure de neutrons peuvent fissionner. Lors de chaque fission, le noyau émet :

- 2 ou 3 "neutrons instantanés", en même temps que la fission.
- des neutrons "retardés", un peu après la fission.

Les fissions induites ne sont provoquées que par des neutrons "lents" (ou "thermiques"), sur des isotopes dits "fissiles". Elles concernent essentiellement des isotopes impairs (nombre de neutrons + protons). Les caractéristiques physiques (énergie, etc.) des neutrons émis lors d'une fission induite sont spécifiques à un isotope.

L'INA consiste à :

- émettre une impulsion de neutrons vers le colis, à l'aide d'une source extérieure (ces neutrons sont dits "rapides"),
- ralentir les neutrons rapides pour qu'ils puissent induire des fissions,
- mesurer finement les caractéristiques des neutrons instantanés ou des neutrons retardés (2 méthodes) émis lors des fissions induites, afin de déterminer les isotopes impairs présents dans les déchets (nature et quantité).

Ces méthodes permettent une caractérisation globale, mais elles sont très dépendantes de la nature des déchets (densité et composition chimique) et de la position du contaminant dans le colis. Lorsque ces effets sont maîtrisés, les limites de détection peuvent atteindre quelques dizaines de milli-grammes de matière fissile.

Comme pour le comptage neutronique passif, il n'est possible de distinguer la contribution des différents isotopes qu'en ayant accès à la composition isotopique par d'autres méthodes complémentaires et indépendantes (spectre radiologique ou mesure gamma spécifique).

Cette technique est généralement réservée aux colis MA-VL contenant des quantités notables d'actinides.

À titre d'exemple, l'Atelier de Compactage des Coques (ACC) de l'usine de traitement des combustibles irradiés à La Hague présente deux postes de mesure par INA (voir figure 12), dont l'objectif principal est de déterminer la masse fissile résiduelle dans les coques à l'issue de la dissolution du combustible (poste avant compactage) et dans le conteneur final de déchets compactés (en sortie d'atelier). Couplée à la spectrométrie gamma, l'INA permet une caractérisation avancée de ces déchets en vue de leur stockage ultime (réf. [9]).

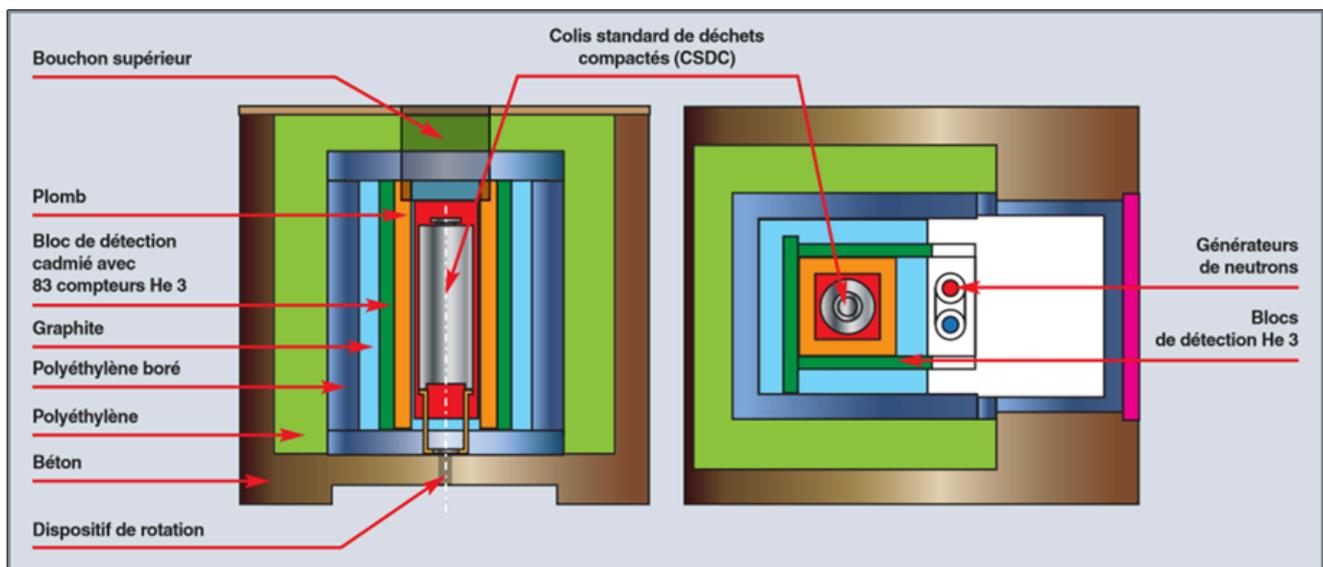


Figure 12 : Modèle numérique du poste de mesure neutronique active des colis de déchets compactés de l'Atelier de Compactage des Coques (ACC) à l'Usine de traitement de la Hague

6. OPTIMISATION DU CHOIX DES FILIÈRES

Nous avons vu dans cette fiche que la caractérisation des déchets était nécessaire pour garantir qu'aucun déchet ne soit "sous-catégorisé", i.e. évacué vers un stockage dont il ne respecte pas les exigences de sûreté.

Pour autant, les coûts relatifs à la gestion des déchets (ensemble des opérations à réaliser, depuis la caractérisation initiale jusqu'au transport et au stockage) peuvent être extrêmement élevés (quelques centaines de k€/m³ pour des déchets MA-VL ou HA, soit des dizaines voire centaines de M€ pour de gros projets de reprise de déchets anciens), et il est donc important de ne pas "sur-catégoriser" des déchets. Une caractérisation rigoureuse peut donc avoir un impact financier considérable.

Dans certains cas de colis anciens dont l'activité a significativement décliné depuis la catégorisation initiale, une nouvelle caractérisation peut permettre de modifier la catégorie des déchets.

Les coûts relatifs à la caractérisation ne constituent qu'une part minime de l'ensemble des coûts de gestion des déchets radioactifs et par ailleurs, la connaissance précise de ces caractéristiques permet d'évacuer les colis vers le stockage définitif le plus approprié, ce qui induit potentiellement des économies conséquentes.

7. GLOSSAIRE

NB : les définitions ci-dessous sont issues de différentes sources. Celles figurant au Journal Officiel sont identifiées "FT" et accessibles via le site FranceTerme <https://www.culture.fr/franceterme/>, domaine "Nucléaire".

Actinides : (Wikipédia) éléments chimiques de l'Actinium (n° 89) au Lawrencium (n° 103), dont Th, U, Np, Pu, Am, Cm.

Activité (radiologique) : (Wikipédia) nombre d'atomes radioactifs qui se désintègrent par unité de temps.

Andra : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

ASND : Autorité de sûreté nucléaire de défense.

ASNR : Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection.

Becquerel (symbole Bq) : (Wikipédia) nombre de désintégrations qui se produisent par seconde dans une certaine quantité de matière radioactive.

Cigeo : Centre industriel de stockage géologique : projet de centre de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde, développé par l'Andra (déchets MA-VL et HA).

Cires : Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage, exploité par l'Andra (déchets TFA).

Colis de déchets radioactifs : (FT) Ensemble constitué d'un conteneur et des déchets radioactifs qu'il contient.

- Colis primaire : (FT) Colis tel qu'il est élaboré par l'installation qui est à l'origine des déchets.
- Colis de stockage : (FT) Colis destiné à être placé, en l'état, dans une installation de stockage.

Contaminé (matériau) : Matériau sur lequel de la radioactivité est déposée sous forme de poussière. Dans certains cas, le matériau est lui-même radioactif (on dit qu'il est "activé", c'est le cas des objets issus de réacteurs).

CSA : Centre de stockage de l'Aube, exploité par l'Andra (déchets FMA-VC).

Déchet préconditionné : (Andra) Déchet pour lequel un traitement complémentaire (décontamination, blocage, compactage, vitrification, fusion, injection, incinération, etc.) est envisagé par son producteur avant stockage.

Déchet radioactif (ou nucléaire) : (FT) Objet ou matière contenant des substances radioactives, dont aucun usage ultérieur n'est envisagé et dont la radioactivité entraîne une gestion spécifique.

Débit de dose : (Wikipédia) dose absorbée* par unité de temps (mesurée en Gray/heure).

Demi-vie (radioactive) : (FT) Temps nécessaire pour la désintégration de la moitié des atomes d'un échantillon du nucléide.

Dose absorbée : (Wikipédia) énergie déposée par unité de masse dans un objet exposé à des rayonnements.

Entreposage (de déchets radioactifs) : Installation conçue pour assurer le confinement des colis de déchets, sur une durée déterminée. Les entreposages sont gérés par les producteurs de déchets.

Filière de gestion (de déchets radioactifs) : ensemble des traitements appliqués au déchet, jusqu'à son stockage définitif (pour les catégories qui l'autorisent à ce jour) ou son entreposage en attente de stockage (pour les autres catégories).

GeHP : détecteur à cristal de Germanium Haute Pureté.

Gray (symbole Gy) : unité de mesure de la dose absorbée . 1 Gray = 1 joule par kilogramme de matière irradiée.

GRVS (ou big-bag) : Conteneur souple, grand récipient pour vrac souple. Utilisé pour le conditionnement des déchets souples TFA.

keV : kilo électron-Volt, unité d'énergie utilisée en physique nucléaire.

IRAS : [Indice Radiologique d'Acceptation au Stockage \(spécifique aux déchets TFA\)](#). Le calcul de cet indice fait notamment intervenir l'activité massique des RN présents.

Matière nucléaire : Matière fertile, fissile ou fusionnable qui est mise en œuvre dans le cycle du combustible ou entre dans la fabrication d'armes nucléaires. Des MN peuvent être présentes dans les déchets, suite aux opérations de maintenance, modifications ou démantèlements de certaines installations.

Noyau fissile/fertile : un noyau fissile est susceptible de subir une [fission](#), s'il est percuté par un neutron. C'est notamment le cas des [isotopes](#) ^{233}U et ^{235}U de l'uranium et des isotopes ^{239}Pu et ^{241}Pu du plutonium. Par ailleurs, un noyau fertile (^{238}U , ^{232}Th , ^{240}Pu) est susceptible de produire un noyau [fissile](#) à la suite de la capture d'un [neutron](#), par exemple : $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{Pu}$

Radionucléide ou "RN" (parfois appelé simplement "nucléide") : atome dont le noyau est radioactif.

RN traceur : Un RN traceur est un RN facilement mesurable et systématiquement présent en quantité importante. Les ratios « RN non mesurables/RN traceur » permettent de calculer l'activité des RN non mesurables. Le traceur pour les déchets issus des réacteurs est le ^{60}Co ; pour les autres installations, c'est le ^{137}Cs . ^{241}Am est souvent utilisé pour les déchets issus du démantèlement des installations nucléaires contenant des RN alpha.

Seuil de déclaration : Pour un RN donné, valeur de l'activité en dessous de laquelle l'Andra n'exige pas de déclaration.

Spectre radiologique déchets : Inventaire des RN susceptibles d'être présents dans un déchet.

Stockage (de déchets radioactifs) : Installation conçue pour assurer le confinement des colis de déchets, sans limitation de durée. Les stockages de déchets radioactifs sont exploités par l'Andra.

Zonage déchets : (FT) Délimitation, dans une installation nucléaire, du périmètre des zones d'où proviennent les déchets radioactifs d'une part, les déchets conventionnels d'autre part.

8. RÉFÉRENCES

[1] Article 09 GAENA : Radioactivité naturelle

https://www.energethique.com/file/ARCEA/Articles/Article_09_Radioactivite_naturel.pdf

[2] Article 15 GAENA : En connaître un rayon

https://www.energethique.com/file/ARCEA/Articles/Article_15_Connaître_rayon.pdf

[3] site CEA : <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite.aspx>

[4] Fiche Argumentaire GAENA : Les déchets radioactifs

https://www.energethique.com/file/ARCEA/Argumentaire/Fiche_ACE_01_Dejets_radioactifs.pdf

[5] site ASNR : <https://www.asnr.fr/information/dossiers-pedagogiques/la-gestion-des-dechets-radioactifs>

[6] site Andra : <https://www.andra.fr/gestion-des-tfa-quel-choix-fait-la-franc-?>

[7] ASN - Guide pratique de mesure de la radioactivité par les citoyens, Annexe 2 "La spectrométrie"

<https://www.asnr.fr/l-asnr-informe/post-accident/les-documents-d-accompagnement#guide-pratique-de-la-mesure-de-la-radioactivite-par-les-citoyens>

[8] CEA - Monographies DEN - L'assainissement-démantèlement des installations nucléaires, p. 51 et suivantes. "La caractérisation des déchets de démantèlement :

<https://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/ouvrages/monographies-nucleaire/assainissement-demantelement-installations-nucleaires.aspx>

[9] CEA - Monographies DEN - L'Instrumentation et la mesure en milieu nucléaire :

https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/monographie-nucleaire/CEA_Monographie8_Instrumentation-mesure-milieu-nucleaire_2018_Fr.pdf