

Collection Énergie nucléaire de l'AIEA

N° NW-T-1.3

**Principes
fondamentaux**

Objectifs

Guides

**Rapports
techniques**

**Gestion des
sources radioactives
scellées retirées
du service**



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

PUBLICATIONS DE LA COLLECTION ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE L'AIEA

STRUCTURE DE LA COLLECTION ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE L'AIEA

Aux termes des articles III.A.3 et VIII.C de son Statut, l'AIEA est autorisée à « favoriser l'échange de renseignements scientifiques et techniques sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques ». Les publications de la **collection Énergie nucléaire de l'AIEA** présentent les bonnes pratiques et les avancées en technologie, ainsi que des exemples pratiques et des données d'expérience dans les domaines des réacteurs nucléaires, du cycle du combustible nucléaire, de la gestion des déchets radioactifs et du déclassé, et sur des questions d'ordre général ayant trait à l'énergie nucléaire. La **collection Énergie nucléaire de l'AIEA** est structurée en quatre niveaux :

- 1) Les **Principes fondamentaux de l'énergie nucléaire** présentent la justification et la perspective d'une utilisation pacifique de l'énergie nucléaire.
- 2) Les **Objectifs** de la **collection Énergie nucléaire** décrivent ce qu'il faut prendre en considération et les objectifs spécifiques à atteindre dans les domaines considérés aux différents stades de la mise en œuvre.
- 3) Les **Guides** et **Méthodologies** de la **collection Énergie nucléaire** contiennent des orientations ou des méthodes précises sur les moyens d'atteindre les objectifs liés aux divers sujets et domaines touchant les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire.
- 4) Les **Rapports techniques** de la **collection Énergie nucléaire** contiennent des informations complémentaires plus détaillées sur les activités liées aux sujets examinés dans la **collection Énergie nucléaire de l'AIEA**.

Les publications de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA sont classées selon les codes suivants : **NG** – énergie nucléaire général ; **NR** – réacteurs nucléaires (auparavant **NP** – électronucléaire) ; **NF** – cycle du combustible nucléaire ; **NW** – gestion des déchets radioactifs et déclassé. Elles sont disponibles sur le site web de l'AIEA :

www.iaea.org/fr/publications.

Pour de plus amples informations, veuillez contacter l'AIEA, Centre international de Vienne, B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche).

Tous les lecteurs des publications de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA sont invités à faire part à cette dernière de leur avis sur ces publications afin qu'elles continuent de répondre à leurs besoins. Ils peuvent le faire sur le site web de l'AIEA, par courrier ou par courriel à l'adresse Official.Mail@iaea.org.

GESTION DES SOURCES
RADIOACTIVES
SCELLÉES RETIRÉES DU SERVICE

Les États ci-après sont Membres de l'Agence internationale de l'énergie atomique :

AFGHANISTAN	GABON	PAPOUASIE-NOUVELLE-GUINÉE
AFRIQUE DU SUD	GÉORGIE	PARAGUAY
ALBANIE	GHANA	PAYS-BAS
ALGÉRIE	GRÈCE	PÉROU
ALLEMAGNE	GRENADE	PHILIPPINES
ANGOLA	GUATEMALA	POLOGNE
ANTIGUA-ET-BARBUDA	GUYANA	PORTUGAL
ARABIE SAOUDITE	HAÏTI	QATAR
ARGENTINE	HONDURAS	RÉPUBLIQUE ARABE
ARMÉNIE	HONGRIE	SYRIENNE
AUSTRALIE	ÎLES MARSHALL	RÉPUBLIQUE
AUTRICHE	INDE	CENTRAFRICAINE
AZERBAÏDJAN	INDONÉSIE	RÉPUBLIQUE DE MOLDOVA
BAHAMAS	IRAN, RÉP. ISLAMIQUE D'	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
BAHREÏN	IRAQ	DU CONGO
BANGLADESH	IRLANDE	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
BARBADE	ISLANDE	POPULAIRE LAO
BÉLARUS	ISRAËL	RÉPUBLIQUE DOMINICAINE
BELGIQUE	ITALIE	RÉPUBLIQUE TCHÈQUE
BÉLIZE	JAMAÏQUE	RÉPUBLIQUE-UNIE
BÉNIN	JAPON	DE TANZANIE
BOLIVIE, ÉTAT	JORDANIE	ROUMANIE
PLURINATIONAL DE	KAZAKHSTAN	ROYAUME-UNI
BOSNIE-HERZÉGOVINE	KENYA	DE GRANDE-BRETAGNE
BOTSWANA	KIRGHIZISTAN	ET D'IRLANDE DU NORD
BRÉSIL	KOWEÏT	RWANDA
BRUNÉI DARUSSALAM	LESOTHO	SAINTE-LUCIE
BULGARIE	LETTONIE	SAINT-MARIN
BURKINA FASO	LIBAN	SAINT-SIÈGE
BURUNDI	LIBÉRIA	SAINT-VINCENT-ET-LES-
CAMBODGE	LIBYE	GRENADINES
CAMEROUN	LIECHTENSTEIN	SAMOA
CANADA	LITUANIE	SÉNÉGAL
CHILI	LUXEMBOURG	SERBIE
CHINE	MACÉDOINE DU NORD	SEYCHELLES
CHYPRE	MADAGASCAR	SIERRA LEONE
COLOMBIE	MALAISIE	SINGAPOUR
COMORES	MALAWI	SLOVAQUIE
CONGO	MALI	SLOVÉNIE
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	MALTE	SOUDAN
COSTA RICA	MAROC	SRI LANKA
CÔTE D'IVOIRE	MAURICE	SUÈDE
CROATIE	MAURITANIE	SUISSE
CUBA	MEXIQUE	TADJIKISTAN
DANEMARK	MONACO	TCHAD
DJIBOUTI	MONGOLIE	THAÏLANDE
DOMINIQUE	MONTÉNÉGR	TOGO
ÉGYPTE	MOZAMBIQUE	TRINITÉ-ET-TOBAGO
EL SALVADOR	MYANMAR	TUNISIE
ÉMIRATS ARABES UNIS	NAMIBIE	TURKMÉNISTAN
ÉQUATEUR	NÉPAL	TURQUIE
ÉRYTHRÉE	NICARAGUA	UKRAINE
ESPAGNE	NIGER	URUGUAY
ESTONIE	NIGERIA	VANUATU
ESWATINI	NORVÈGE	VENEZUELA,
ÉTATS-UNIS	NOUVELLE-ZÉLANDE	RÉP. BOLIVARIENNE DU
D'AMÉRIQUE	OMAN	VIET NAM
ÉTHIOPIE	OUGANDA	YÉMEN
FÉDÉRATION DE RUSSIE	OUBÉKISTAN	ZAMBIE
FIDJI	PAKISTAN	ZIMBABWE
FINLANDE	PALAOS	
FRANCE	PANAMA	

Le Statut de l'Agence a été approuvé le 23 octobre 1956 par la Conférence sur le Statut de l'AIEA, tenue au Siège de l'Organisation des Nations Unies, à New York ; il est entré en vigueur le 29 juillet 1957. L'Agence a son Siège à Vienne. Son principal objectif est « de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ».

COLLECTION ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE L'AIEA N° NW-T-1.3

GESTION DES SOURCES
RADIOACTIVES
SCELLÉES RETIRÉES DU SERVICE

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE
VIENNE, 2022

NOTE CONCERNANT LE DROIT D'AUTEUR

Toutes les publications scientifiques et techniques de l'AIEA sont protégées par les dispositions de la Convention universelle sur le droit d'auteur adoptée en 1952 (Berne) et révisée en 1972 (Paris). Depuis, l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (Genève) a étendu le droit d'auteur à la propriété intellectuelle sous forme électronique et virtuelle. La reproduction totale ou partielle des textes contenus dans les publications de l'AIEA sous forme imprimée ou électronique est soumise à autorisation préalable et habituellement au versement de redevances. Les propositions de reproduction et de traduction à des fins non commerciales sont les bienvenues et examinées au cas par cas. Les demandes doivent être adressées à la Section d'édition de l'AIEA :

Unité de la promotion et de la vente
Section d'édition
Agence internationale de l'énergie atomique
Centre international de Vienne
B.P. 100
1400 Vienne (Autriche)
Télécopie : +43 1 26007 22529
Téléphone : +43 1 2600 22417
Courriel : sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/publications

© AIEA, 2022
Imprimé par l'AIEA en Autriche
Mai 2022
STI/PUB/1657

GESTION DES SOURCES RADIOACTIVES
SCÉLÉES RETIRÉES DU SERVICE
AIEA, VIENNE, 2022
STI/PUB/1657
ISBN 978-92-0-224320-0 (paperback : alk. paper)
ISBN 978-92-0-224420-7 (pdf)
ISSN 2617-944X

AVANT-PROPOS

Selon l'un de ses objectifs statutaires, l'AIEA « s'efforce de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ». Cet objectif est notamment atteint par la publication de plusieurs collections techniques, parmi lesquelles la collection Énergie nucléaire et la collection Normes de sûreté de l'AIEA.

Aux termes de l'article III.A.6 du Statut de l'AIEA, les normes de sûreté sont des « normes de sûreté destinées à protéger la santé et à réduire au minimum les dangers auxquels sont exposés les personnes et les biens ». Les normes de sûreté comprennent les fondements de sûreté, les prescriptions de sûreté et les guides de sûreté. Elles sont principalement rédigées dans un style réglementaire et s'imposent à l'AIEA pour ses propres programmes. Les principaux utilisateurs de ces normes sont les organismes de réglementation des États Membres et d'autres autorités nationales.

La collection Énergie nucléaire de l'AIEA comprend des rapports destinés à encourager et à faciliter le développement et l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques, ainsi que la recherche dans ce domaine. Ces rapports contiennent des exemples qui peuvent notamment être utiles aux propriétaires et aux exploitants d'entreprises de services publics, aux organismes d'application, aux universités et aux responsables publics. Les informations sont présentées dans des guides, des rapports sur l'état de la technologie et sur ses avancées et des pratiques optimales concernant les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire, établies à partir des éléments communiqués par des experts internationaux. La collection Énergie nucléaire de l'AIEA complète la collection Normes de sûreté.

Les sources radioactives scellées sont largement utilisées dans l'industrie, en médecine et dans la recherche dans les États Membres depuis de nombreuses décennies. Bien que la plupart des États Membres aient établi un cadre réglementaire pour les contrôler et disposent de capacités techniques adéquates pour les manipuler correctement, il subsiste encore un certain nombre d'incertitudes concernant la gestion de ces sources au cours de leur cycle de vie. Les schémas et les pratiques de gestion mis en œuvre actuellement dans les États Membres peuvent être quelque peu contradictoires et créer des problèmes d'entreposage, en particulier de stockage définitif de ces sources. Par exemple, il n'y a pas de consensus sur les méthodes appropriées de conditionnement des sources conservées dans les installations centrales d'entreposage provisoire. La plupart du temps, les méthodes utilisées sont en grande partie déterminées par les installations disponibles, lesquelles peuvent avoir été construites pour traiter principalement d'autres types de déchets. Il ressort de l'expérience de l'AIEA concernant sa collaboration avec les États Membres qu'un grand nombre de ceux-ci disposent d'infrastructures modestes et de budgets limités, ce qui signifie qu'on doit adopter des solutions simples, peu coûteuses et faciles, tout en évitant de compromettre la sûreté ou la sécurité.

Reconnaissant la nécessité d'aider les États Membres à assurer la gestion sûre efficace des sources retirées du service, l'AIEA a élaboré un « Plan d'action pour la sûreté des sources de rayonnements et la sécurité des matières radioactives », axé sur l'élaboration d'une série de publications traitant de la manipulation, du conditionnement, de l'entreposage et du stockage définitif de ces sources. Les titres de cette série, par exemple « Manuels techniques pour la gestion des déchets de faible ou moyenne activité produits dans les petits centres de recherche nucléaire et par les utilisateurs de radio-isotopes en médecine, dans la recherche et l'industrie », sont publiés depuis les années 1990 dans le but de répondre aux besoins des États Membres en développement en recommandant des solutions technologiques qui peuvent permettre de respecter les prescriptions, de mettre en œuvre les solutions et d'observer les critères définis dans les publications de l'AIEA, et être facilement intégrées dans un programme national global.

Bien que les États Membres aient profité de ces publications parues au cours des deux dernières décennies, on a estimé qu'elles devaient être révisées et mises à niveau pour tirer parti des nouveaux développements et garantir le respect des normes modernes. Étant donné que les rapports publiés antérieurement traitaient de domaines particuliers de la gestion des sources scellées retirées du service pour différentes catégories de sources, la présente publication pourrait fournir une bonne occasion de fusionner leurs contenus en un seul rapport.

Jusqu'à une date récente, l'accent était principalement mis sur la sûreté des sources radioactives, leur sécurité étant l'un des aspects de cette sûreté. Cependant, étant donné le risque d'utilisation de ces sources dans des actes malveillants, cette sécurité acquiert une nouvelle urgence. La nouvelle approche du contrôle des sources radioactives tout au long de leur cycle de vie peut permettre de les protéger contre les utilisations malveillantes. Cela signifie que la prise en compte de la sécurité pendant tout le cycle de vie de ces sources, couvrant toutes les phases, y compris la fabrication, la distribution, l'installation, la mise en service, l'utilisation, l'entreposage et le stockage définitif, revêt une importance capitale.

Le présent rapport résume les informations contenues dans les publications antérieures de l'AIEA et fournit des orientations à jour sur la gestion des sources radioactives scellées retirées du service. Les problèmes rencontrés et les enseignements tirés sont mentionnés dans ce rapport pour permettre d'éviter les erreurs commises dans le passé dans la gestion de ces sources.

MM. J. Balla et J.C. Benitez-Navarro, de la Division de la sûreté radiologique et de la sûreté des déchets, sont les deux administrateurs de l'AIEA responsables du présent document.

NOTE DE L'ÉDITEUR

Le présent rapport a été édité par l'équipe rédactionnelle de l'AIEA dans la mesure jugée nécessaire pour en faciliter la lecture. Il ne traite pas des questions de la responsabilité, qu'elle soit juridique ou autre, résultant d'actes ou omissions imputables à une quelconque personne.

Bien que l'exactitude des informations contenues dans la présente publication ait fait l'objet d'un soin particulier, ni l'AIEA ni ses États Membres n'assument une quelconque responsabilité pour les conséquences éventuelles de leur utilisation.

L'emploi d'appellations particulières pour désigner des pays ou des territoires n'implique de la part de l'éditeur, l'AIEA, aucune prise de position quant au statut juridique de ces pays ou territoires, ou de leurs autorités et institutions, ni quant au tracé de leurs frontières.

La mention de noms de sociétés ou de produits particuliers (qu'ils soient ou non signalés comme marques déposées) n'implique aucune intention d'empiéter sur des droits de propriété et ne doit pas être considérée non plus comme valant approbation ou recommandation de la part de l'AIEA.

L'AIEA n'assume aucune responsabilité quant à la persistance ou l'exactitude des adresses URL de sites Internet externes ou de tiers mentionnées dans le présent ouvrage et ne peut garantir que le contenu desdits sites est ou demeurera exact ou approprié.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
1.1.	Contexte.....	1
1.2.	Objectif	3
1.3.	Champ d'application	3
1.4.	Structure.....	3
2.	CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES RADIOACTIVES SCELLÉES.....	5
2.1.	Caractéristiques radiologiques, physiques et chimiques	5
2.1.1.	Formes physiques	5
2.1.2.	Type de rayonnement.....	6
2.1.3.	Caractéristiques physiques et chimiques des radionucléides.....	6
2.2.	Structure et conception	11
2.2.1.	Sources gamma	11
2.2.2.	Sources alpha.....	12
2.2.3.	Sources bêta.....	13
2.2.4.	Sources de neutrons	14
2.3.	Dimensions	14
2.4.	Condition physique	15
3.	CATÉGORISATION ET CLASSIFICATION	16
3.1.	Justification de la catégorisation des sources radioactives	16
3.2.	Système de catégorisation des sources de l'AIEA.....	17
3.3.	Regroupement des sources par l'AIEA aux fins de la sécurité	19
3.4.	Classification ISO des sources	20
4.	APPLICATIONS, DISPOSITIFS ET SOURCES SCELLÉES ASSOCIÉES	21
4.1.	Dispositifs et sources de catégorie 1	21
4.1.1.	Générateurs thermoélectriques à radio-isotopes	21
4.1.2.	Irradiateurs.....	22
4.1.3.	Dispositifs de téléthérapie	27
4.1.4.	Dispositifs fixes de téléthérapie multifaisceaux (Gamma Knife®).....	29
4.2.	Dispositifs et sources de catégorie 2	30
4.2.1.	Projecteurs de gammagraphie industrielle.....	30
4.2.2.	Dispositifs de curiethérapie à débit de dose élevé/moyen.....	33
4.2.3.	Système d'étalonnage	34
4.3.	Dispositifs et sources de catégorie 3	35
4.3.1.	Jauges industrielles fixes	35
4.3.2.	Sondes de diagraphie.....	36
4.3.3.	Stimulateurs cardiaques.....	38
4.4.	Dispositifs et sources de catégorie 4	39
4.4.1.	Sources de curiethérapie à faible débit de dose.....	39
4.4.2.	Jauges d'épaisseur/de niveau de remplissage	39
4.4.3.	Jauges portables d'humidité/de densité	40
4.4.4.	Ostéodensitomètres	42

4.4.5. Éliminateurs d'électricité statique	42
4.5. Dispositifs et sources de catégorie 5	43
4.6. Situations particulières	45
4.6.1. Paratonnerres	45
4.6.2. Utilisations dans la recherche et le monde universitaire	45
4.6.3. Utilisations militaires.	46
4.7. Masse et dimensions de dispositifs courants	47
5. PRINCIPES ET PRESCRIPTIONS DE GESTION.	49
5.1. Contrôle réglementaire	50
5.2. Responsabilités	50
5.2.1. Fabricant de sources	51
5.2.2. Fabricant de dispositifs/d'équipements	52
5.2.3. Distributeur	52
5.2.4. Utilisateur	52
5.2.5. Organisme central de gestion des déchets radioactifs	53
5.2.6. Installations de stockage définitif	53
5.3. Registre des sources radioactives scellées.	53
5.4. Déclaration de sources comme retirées du service	54
5.4.1. Décroissance d'activité	54
5.4.2. Fuites ou dommages	54
5.4.3. Équipements obsolètes.	54
5.4.4. Disponibilité d'autres technologies	55
5.4.5. Changements de priorités	55
5.4.6. Sources orphelines.	55
5.5. Financement.	56
5.5.1. Répartition des coûts	56
5.5.2. Incertitude des coûts	57
5.5.3. Impossibilité de transférer la propriété	57
5.6. Capacités techniques	57
5.6.1. Site de l'utilisateur.	58
5.6.2. Organisme central de gestion des déchets radioactifs	58
5.6.3. Installations de stockage définitif	58
5.7. Formation du personnel.	58
5.8. Système de gestion	59
5.8.1. Problèmes liés au système de gestion	60
5.8.2. Procédures du système de gestion	61
5.8.3. Approche graduée	61
5.8.4. Gestion des dossiers.	62
5.8.5. Élaboration et contrôle des processus	62
5.9. Préparation et conduite des interventions d'urgence.	63
5.10. Sécurité des sources radioactives	63
5.11. Contrôle de la criticité.	64
5.12. Contrôle radiologique	65
5.13. Problèmes rencontrés et enseignements tirés	65
5.13.1. Particularités du système de réglementation	65
5.13.2. Qualité du registre des sources	67
5.13.3. Exemption	68
5.13.4. Financement.	68
5.13.5. Gestion des dossiers.	68

5.13.6. Évaluation du système de gestion	69
6. STRATÉGIE DE GESTION.....	70
6.1. Conditions préalables à l'élaboration de la stratégie.....	70
6.2. Options de gestion stratégique.....	71
6.2.1. Transfert à un autre utilisateur autorisé	73
6.2.2. Retour au fournisseur/fabricant	73
6.2.3. Entreposage avant stockage définitif.....	74
6.2.4. Stockage définitif	75
6.3. Type d'installation.....	75
6.3.1. Installations partagées	75
6.3.2. Installations centralisées	76
6.3.3. Installations mobiles	76
6.4. Élaboration d'une stratégie de gestion	76
6.5. Problèmes rencontrés et enseignements tirés	77
6.5.1. Questions d'ordre général	77
6.5.2. Transfert à un autre utilisateur autorisé	77
6.5.3. Retour au fournisseur/fabricant	77
6.5.4. Entreposage avant stockage définitif.....	78
6.5.5. Stockage définitif.....	78
7. CARACTÉRISATION DES SOURCES RETIRÉES DU SERVICE	80
7.1. Informations requises	80
7.2. Groupes de caractérisation des sources retirées du service	80
7.3. Identification des sources	81
7.4. Caractérisation des sources non documentées.....	83
7.4.1. Prescriptions du système de caractérisation	83
7.4.2. Extraction des données historiques	84
7.4.3. Caractérisation par les méthodes d'AND	85
7.4.4. Caractérisation par les méthodes d'analyse destructive	85
7.5. Caractérisation des sources présentant des fuites	86
7.6. Enseignements tirés.....	86
8. MANUTENTION DES SOURCES.....	88
8.1. Prescriptions relatives à la sûreté de la manutention.....	88
8.2. Planification du travail.....	88
8.3. Gestion courante des sources.....	89
8.3.1. Collecte	89
8.3.2. Séparation	90
8.3.3. Retrait des sources des dispositifs.....	91
8.3.4. Relocalisation sur site	92
8.4. Équipements et outils de manutention des sources	92
8.4.1. Tenailles et bouclier temporaire.....	93
8.4.2. Sorbonne	94
8.4.3. Cellules chaudes	96
8.4.4. Conteneurs.....	96
8.4.5. Matériel de levage et de transfert.....	97
8.5. Problèmes liés à la manutention des sources de haute activité	99

9.	ENTREPOSAGE	101
9.1.	Prescriptions relatives à la conception des colis de sources radioactives scellées retirées du service.....	102
9.2.	Prescriptions relatives à la conception des installations d'entreposage	103
9.3.	Prescriptions relatives à l'exploitation des installations d'entreposage	104
9.3.1.	Réception et mise en place	105
9.3.2.	Protection supplémentaire	105
9.3.3.	Contrôle d'intégrité	106
9.3.4.	Récupération et expédition	106
9.3.5.	Système de sécurité	106
9.4.	Exemples d'installations d'entreposage sur site.....	107
9.4.1.	Coffres-forts au sol	107
9.4.2.	Pièce résistantes aux intrusions	108
9.4.3.	Bunkers/casemates en béton	109
9.4.4.	Comparaison des systèmes d'entreposage sur site	109
9.4.5.	Problèmes rencontrés et enseignements tirés	110
9.5.	Exemples d'installations d'entreposage centralisé.....	114
9.5.1.	Entreposage souterrain.....	115
9.5.2.	Entreposage en surface	116
9.5.3.	Problèmes rencontrés et enseignements tirés	118
10.	CONDITIONNEMENT	122
10.1.	Impact des prescriptions d'acceptation des colis.....	122
10.2.	Spécifications des colis de déchets	123
10.3.	Prescriptions relatives à la conception des installations de conditionnement.....	124
10.4.	Prescriptions relatives à l'exploitation des installations de conditionnement.....	124
10.5.	Sélection d'une méthode de conditionnement.....	125
10.5.1.	Critères de sélection.....	125
10.5.2.	Sélection des matériaux pour les colis de déchets.....	125
10.6.	Méthodes de conditionnement.....	126
10.6.1.	Sources retirées du service contenant des radionucléides à courte période.....	126
10.6.2.	Sources retirées du service contenant des radionucléides à longue vie.....	128
10.6.3.	Sources de neutrons.....	131
10.6.4.	Sources de haute activité retirées du service.....	132
10.7.	Installation de cellules chaudes mobiles de l'AIEA	134
10.8.	Enseignements tirés.....	136
10.8.1.	Sources à courte période	136
10.8.2.	Sources à longue période.....	136
10.8.3.	Sources de haute activité.....	137
11.	TRANSPORT	138
11.1.	Règlement de transport	138
11.2.	Options de transport.....	139
11.2.1.	Source laissée dans le porte-source d'origine	140
11.2.2.	Sources retirées du porte-source d'origine	143
11.3.	Problèmes rencontrés et enseignements tirés	146
11.3.1.	Financement insuffisant.....	146
11.3.2.	Problèmes de licence	147

11.3.3. Absence de certificat de source ou d'informations sur la source	147
11.3.4. Absence de certificat de matière radioactive sous forme spéciale	147
11.3.5. Inadéquation de l'emballage de transport d'origine	147
12. STOCKAGE DÉFINITIF	149
12.1. Facteurs dont dépend le choix des options de stockage définitif	149
12.1.1. Système de classification des déchets de l'AIEA	150
12.1.2. Stock de sources radioactives scellées retirées du service, caractéristiques des radionucléides et classes de déchets correspondantes	151
12.1.3. Options de stockage définitif de sources radioactives scellées retirées du service dans le contexte du stock national de déchets radioactifs	153
12.1.4. Conditionnement des sources radioactives scellées retirées du service pour le stockage définitif – colis de déchets	155
12.1.5. Critères d'acceptation des déchets pour stockage définitif	156
12.2. Options de stockage définitif	157
12.2.1. Stockage définitif en surface ou à faible profondeur	157
12.2.2. Stockage géologique	159
12.2.3. Stockage définitif en puits	159
12.3. Problèmes rencontrés et enseignements tirés	162
12.3.1. Stockage définitif en surface ou à faible profondeur	162
12.3.2. Stockage géologique	163
12.3.3. Stockage définitif en puits	164
13. ARGUMENTAIRE DE SÛRETÉ ET ÉVALUATION DE LA SÛRETÉ	165
13.1. Principes d'évaluation de la sûreté	165
13.2. Processus d'évaluation de la sûreté	166
14. CONCLUSIONS	169
RÉFÉRENCES	171
ABRÉVIATIONS	177
ANNEXE : RISQUES ASSOCIÉS AUX SOURCES RETIRÉES DU SERVICE	179
PERSONNES AYANT COLLABORÉ À LA RÉDACTION ET À L'EXAMEN	185

1. INTRODUCTION

1.2. CONTEXTE

Les sources radioactives scellées sont largement utilisées en agriculture, dans l'industrie, en médecine et dans divers domaines de la recherche dans les États Membres développés et en développement. Pratiquement tous les pays s'en servent dans un but ou un autre. Le stock mondial total de sources radioactives scellées est estimé à plusieurs millions. Bien qu'elles soient pour la plupart de petite taille, un grand nombre d'entre elles contiennent de très fortes concentrations de radionucléides (les concentrations des sources utilisées dans l'industrie et en médecine se chiffrent généralement en GBq ou en PBq). Elles émettent des rayonnements assez intenses et il faut des conteneurs lourdement blindés pour garantir la sûreté de leur utilisation, de leur transport et de leur entreposage.

Une source radioactive qui n'est plus utilisée et n'est plus destinée à l'être dans le cadre de la pratique pour laquelle une autorisation a été octroyée est appelée *source retirée du service* [1]. Une source qui n'est plus à même de remplir la fonction à laquelle elle est destinée en raison de la décroissance radioactive est appelée *source usée*. Il importe de souligner qu'une source déclarée comme retirée du service par un utilisateur peut encore être employée par un autre utilisateur, un fournisseur ou un fabricant. Une source radioactive scellée retirée du service ou usée peut encore être hautement radioactive et potentiellement dangereuse pour la santé humaine et l'environnement. La nature et l'ampleur des divers problèmes associés aux sources radioactives scellées retirées du service sont examinés dans la référence [2].

Bien que la grande majorité des sources radioactives utilisées dans le monde soient gérées de manière sûre et sécurisée et procurent de nombreux avantages à l'humanité, un certain nombre d'accidents impliquant ces sources se sont produits [3 à 10]. Lorsque la quantité de matières radioactives est importante, comme dans le cas des sources de radiothérapie ou de radiographie industrielle, ces accidents ont eu des conséquences graves, voire mortelles [3, 5]. La majorité des accidents ont mis en jeu des sources radioactives scellées en service, qui étaient encore sous contrôle réglementaire, mais plusieurs d'entre eux se sont produits avec des sources retirées du service qui n'étaient soumises à aucun contrôle réglementaire ou dont le contrôle était inadéquat. Certains d'entre eux ont entraîné la contamination de vastes zones qui ont nécessité des opérations coûteuses de nettoyage pour en atténuer les conséquences [3].

Pour réduire les risques associés aux sources radioactives scellées retirées du service, il importe de disposer d'une stratégie nationale bien conçue, d'un cadre juridique et d'une infrastructure pour leur gestion sûre, tant sur le site de l'utilisateur que dans l'ensemble du pays. Il est essentiel que les sources, qu'elles soient en service ou déclarées retirées du service, ne présentent aucun danger potentiel pour les travailleurs, le public en général ou l'environnement. L'idéal serait que toutes les prescriptions relatives à la gestion sûre des sources radioactives scellées retirées du service soient appliquées et mises en œuvre avant de lancer une application particulière des sources radioactives scellées dans un État Membre.

Les pays qui ne disposent pas d'une infrastructure complète de radioprotection et de systèmes de gestion des déchets peuvent ne pas être conscients des risques associés aux sources radioactives retirées du service. Même des pays développés qui utilisent largement les sources radioactives scellées peuvent sous-estimer les risques encourus et, par conséquent, ne pas avoir un contrôle pleinement efficace de leurs sources radioactives, même s'ils disposent d'une législation, d'une infrastructure de radioprotection et d'un système de gestion des déchets efficaces [9]. D'autres pays n'accordent pas un niveau de priorité suffisamment élevé aux programmes de gestion des sources radioactives scellées retirées du service parce qu'ils doivent consacrer leurs ressources disponibles à des problèmes plus urgents. Même si les risques associés à l'utilisation de sources radioactives scellées sont reconnus, il y a encore des risques potentiels importants liés aux sources radioactives scellées retirées du service.

Le nombre de sources radioactives retirées du service existant dans un État Membre donné n'influe pas sur les conséquences d'un accident particulier, mais augmente la probabilité qu'un accident se produise. Celle-ci dépend aussi du degré de contrôle réglementaire et de son efficacité. Les conséquences

d'un accident dépendent des caractéristiques de la source (sa conception, son activité, sa forme chimique, etc.), de la nature de cet accident, des personnes impliquées, des contre-mesures prises, etc.

Au cours des années 1990, les préoccupations internationales étaient croissantes en ce qui concerne les sources radioactives qui, pour une raison ou une autre, n'étaient soumises à aucun contrôle réglementaire ou dont le contrôle était inadéquat. Le programme de l'AIEA sur les sources radioactives scellées retirées du service a été établi en 1991 dans le but particulier d'aider les États Membres dans leurs efforts visant à éviter des situations qui pourraient entraîner des expositions inutiles aux rayonnements ou des accidents. Il comprend la fourniture d'une assistance technique à ces États sous forme de rapports techniques de l'Agence, la formation d'experts et le développement ou l'amélioration de l'infrastructure requise, par la mise à disposition d'outils, d'équipements et le transfert de technologies par le biais du service d'évaluation de l'AIEA pour l'examen du cadre réglementaire de sûreté radiologique d'un État Membre.

En 2011, l'Agence a publié, dans la catégorie Prescriptions générales de sûreté, collection Normes de sûreté de l'AIEA, n° GSR Part 3, le document intitulé Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté (NFI), Édition provisoire [11]. Ce document remplace la publication Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements, parue en 1996 [12]. La Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs (la Convention commune) [13] est un instrument juridiquement contraignant établi sur la gestion des déchets radioactifs. En vertu de son article 28, les parties contractantes sont tenues de veiller à la sûreté de la détention, du reconditionnement ou du stockage définitif des sources scellées retirées du service et d'autoriser le retour des sources radioactives scellées retirées du service sur leur territoire (si cela est conforme à leur droit interne). L'AIEA a également publié le Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives [14]. Ce code a pour objectifs, grâce à l'élaboration, à l'harmonisation et à l'application de politiques, de lois et de règlements nationaux, ainsi qu'à la promotion de la coopération internationale :

- d'obtenir et maintenir pour les sources radioactives un niveau élevé de sûreté et de sécurité ;
- d'empêcher un accès non autorisé ou des dommages à des sources radioactives, ainsi que la perte, le vol et la cession non autorisée de ces sources, de manière à atténuer la probabilité d'une exposition accidentelle nocive à ces sources ou leur utilisation à des fins malveillantes en vue de causer des dommages à des personnes, à la société ou à l'environnement ;
- d'atténuer ou limiter au maximum les conséquences radiologiques d'un accident ou d'un acte malveillant mettant en jeu une source radioactive.

L'AIEA continue d'explorer les moyens d'améliorer son programme de gestion des déchets radioactifs pour soutenir divers États Membres. Une nouvelle initiative est spécifiquement liée à la gestion de la fin de vie des sources radioactives scellées retirées du service, y compris lorsqu'elles sont gérées comme des déchets radioactifs. Jusqu'à une date récente, l'accent était principalement mis sur la sûreté des sources radioactives, leur sécurité étant l'un des aspects de cette sûreté. Cependant, étant donné le risque d'utilisation de ces sources dans des actes malveillants, cette sécurité a pris une nouvelle urgence. La nouvelle approche du contrôle des sources radioactives tout au long de leur durée de vie peut permettre de les protéger contre les utilisations malveillantes. Cela signifie que la prise en compte de la sécurité pendant tout le cycle de vie de ces sources, couvrant toutes les phases, y compris la fabrication, la distribution, l'installation, la mise en service, l'utilisation, l'entreposage et le stockage définitif, revêt une importance capitale.

1.2. OBJECTIF

Le présent rapport vise principalement à fournir du matériel de référence et des orientations techniques sur tous les aspects de la gestion sûre des sources radioactives scellées retirées du service, y compris la manutention, le conditionnement, le transport, l'entreposage et le stockage définitif de ces sources. Il devrait être utile et directement pertinent pour diverses parties prenantes, notamment les décideurs, les utilisateurs des sources radioactives scellées, les exploitants d'installations de gestion des déchets et les organismes de réglementation, en particulier dans les États Membres qui explorent des options ou élaborent des stratégies pour la gestion sûre des sources radioactives scellées retirées du service. Cette publication vise à répondre aux besoins de divers États Membres en ce qui concerne la gestion de ces sources, qu'il s'agisse de pays ayant une infrastructure de gestion des sources radioactives et un cadre réglementaire relativement bien développés ou de pays qui en sont au tout début de la planification conceptuelle dans ce domaine.

1.3. CHAMP D'APPLICATION

Ce rapport présente, sur la gestion des sources radioactives scellées retirées du service, des informations fondées sur les données compilées dans une série de publications techniques antérieures de l'AIEA parues entre 1990 et 2003 [2, 15 à 19]. Cependant, les renseignements contenus dans ces publications ont été revus et améliorés par la prise en compte de nouvelles techniques de gestion datant de ces dernières années.

Les informations contenues dans le présent rapport s'appliquent à tous les types de sources radioactives scellées retirées du service, à l'exception de celles exemptées de contrôle réglementaire, par exemple les sources des montres ou des cadrans d'instruments. Toutefois, elles s'appliquent aux détecteurs de fumée et aux autres sources de faible activité, qui sont exemptés du contrôle réglementaire lorsque ces sources sont considérées séparément, mais qui, après avoir été regroupées, peuvent représenter un risque important, et donc nécessiter une gestion sûre. Le rapport examine, de manière relativement détaillée, diverses approches, options et procédures pour la manutention, le conditionnement, le transport, l'entreposage et le stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service, ainsi que les prescriptions associées du système de gestion. Certains problèmes rencontrés et les enseignements tirés sont présentés pour chaque étape de la gestion des déchets.

1.4. STRUCTURE

Le présent rapport comprend 14 sections et une annexe. Les sections 2 à 6 portent sur les aspects généraux de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service et les sections 7 à 12 sur les principales étapes de cette gestion dans l'ordre. Cet ordre est celui d'un scénario idéal de gestion de ces sources, lorsque tous les organismes, les installations et le personnel requis sont disponibles. Bien entendu, une telle situation existe rarement dans la plupart des États Membres, mais cette approche a le mérite de montrer ce scénario idéal. Chaque section consacrée à une étape donnée de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service se termine sur quelques exemples et les enseignements appropriés tirés.

La section 2 présente les principales caractéristiques radiologiques, physiques et chimiques des sources radioactives scellées, qui sont importantes dans le choix des options appropriées pour leur gestion.

La section 3 fournit des informations générales sur les approches internationales actuelles de catégorisation et de classification des sources radioactives scellées.

La section 4 décrit les dispositifs ainsi que les sources associées qui sont utilisés dans diverses applications, en tenant compte du fait qu'une bonne compréhension de l'application particulière de la

source et de l'équipement utilisé constitue un paramètre important dans l'élaboration d'une stratégie de gestion des sources retirées du service.

La section 5 présente les éléments de base d'un système national de gestion sûre des sources radioactives retirées du service, y compris les aspects juridiques, réglementaires et d'autorisation, les capacités techniques et les mécanismes de financement, et décrit les éléments d'un système de gestion moderne appliqué à toutes les activités. Elle expose en outre les principales raisons et justifications permettant de déclarer qu'une source radioactive scellée est « retirée du service » ou « usée ».

La section 6 examine une approche à mettre en œuvre pour choisir une stratégie de gestion des sources radioactives retirées du service et décrit diverses options de gestion clés.

La section 7 est consacrée à la caractérisation des sources radioactives scellées par diverses méthodes non destructives et destructives et souligne le rôle de cette caractérisation dans le choix d'une option de gestion sûre et sécurisée.

La section 8 examine les procédures de manutention, les équipements et les outils utilisés à différentes étapes de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service.

La section 9 est consacrée à l'entreposage non seulement des sources retirées du service non conditionnées conservées dans les locaux de l'utilisateur, mais aussi des sources radioactives scellées retirées du service conditionnées conservées dans les entrepôts centraux. Un accent particulier est mis d'une part sur les caractéristiques de conception d'un colis de déchets accepté pour entreposage, d'autre part sur les prescriptions de conception d'une installation d'entreposage, en soulignant l'importance de l'évaluation de la sûreté de ces installations. Elle résume en outre les approches utilisées, et décrit notamment des procédés particuliers pour l'entreposage des sources de haute activité.

La section 10 examine le conditionnement de différents types de sources retirées du service. Elle commence par les prescriptions de conditionnement, y compris la conception, l'exploitation et la tenue de registres et présente ensuite des recommandations sur le choix d'une méthodologie de conditionnement appropriée, en décrivant notamment diverses méthodes de conditionnement.

La section 11 est consacrée au transport des sources radioactives retirées du service. Elle présente en outre le Règlement de transport de l'AIEA ainsi que les problèmes de transport propres aux sources radioactives de haute activité, et certaines options de transport.

La section 12 explore les options de stockage définitif des sources radioactives retirées du service, et notamment les caractéristiques particulières des sources dont le stockage définitif pose problème. Elle examine en outre les problèmes rencontrés et les enseignements tirés, ainsi que le concept de stockage définitif en puits comme option potentiellement prometteuse.

La section 13 décrit le rôle des évaluations de la sûreté tout au long de la durée de vie de l'installation ou de l'activité, chaque fois que les concepteurs, les constructeurs, les fabricants, l'organisme exploitant ou l'organisme de réglementation devraient prendre des décisions sur les options de gestion et les problèmes de sûreté connexes. Elle donne également un bref aperçu du processus d'élaboration des évaluations de la sûreté.

La section 14 résume les progrès accomplis dans la gestion des sources radioactives retirées du service, en mettant l'accent sur certaines activités importantes pour aborder les aspects problématiques.

L'annexe examine les risques radiologiques associés aux sources retirées du service, en particulier lorsque le contrôle était inadéquat voire complètement perdu, et passe brièvement en revue certains accidents concernant des sources retirées du service.

2. CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES RADIOACTIVES SCÉLÉES

On appelle source de rayonnement toute source capable d'émettre un rayonnement ionisant. Les sources considérées dans la présente publication sont les sources radioactives scellées, lesquelles contiennent des matières radioactives comme principale source de rayonnement ionisant (les autres sources peuvent être des sources de rayons X, des réacteurs nucléaires ou des accélérateurs de particules). Le glossaire de sûreté de l'AIEA [1] définit les sources scellées comme des « matières radioactives enfermées d'une manière permanente dans une capsule ou fixées sous forme solide ». La capsule ou le matériau de fabrication de la source scellée est suffisamment durable et solide pour rester étanche dans les conditions d'utilisation et d'usure prévues de la source, ainsi qu'en cas d'anomalie prévisible.[10]. Dans de nombreux cas, on a recours à la double encapsulation.

Les sources radioactives sont utilisées dans un large éventail de pratiques dans les domaines de l'industrie, de la médecine, de l'agriculture, de la recherche et de l'enseignement, ainsi que dans les applications militaires et de défense. Les sources employées dans ces applications contiennent une variété de radionucléides, de formes et de quantités de matières radioactives et présentent un large éventail de propriétés physiques, chimiques et radiologiques.

Lorsqu'une source scellée est retirée du service, il faut choisir une option appropriée pour sa gestion. Pour ce faire, il est important d'avoir toutes les informations nécessaires sur les paramètres de la source. Les sections suivantes décrivent brièvement les paramètres et les caractéristiques des sources scellées les plus importants pour le choix et la mise en œuvre de cette option.

Les paramètres les plus importants sont les suivants :

- La forme physique : surtout solide ; liquide ou gaz (dans de très rares cas).
- Les caractéristiques radiologiques : le radionucléide, le type de rayonnement (α , β , γ , neutron), l'activité, la période radioactive, l'énergie et les facteurs de conversion de dose.
- L'émission de neutrons (pour les sources de neutrons).
- Les caractéristiques chimiques : les composés ou les alliages utilisés, la solubilité, etc.
- La structure et la conception (y compris les dimensions du matériau de remplissage actif et de la capsule).
- La condition physique : source intacte, endommagée ou qui fuit.
- Les autres caractéristiques liées au mode particulier d'application de la source (résistance à la corrosion, propriétés thermiques, stabilité, etc.).

La période du radionucléide d'une source et son activité sont particulièrement importantes pour choisir une option de stockage définitif des sources retirées du service.

2.1. CARACTÉRISTIQUES RADIOLOGIQUES, PHYSIQUES ET CHIMIQUES

2.1.1. Formes physiques

On peut regrouper les matières radioactives contenues dans les sources radioactives scellées comme suit, en fonction de leurs propriétés physiques :

- Solides : principalement des métaux, la céramique, une poudre parfois comprimée et rarement des sels solubles.
- Gaz : principalement le ^{85}Kr l' ^3H .
- Liquides : dans de rares cas.

Les poudres ou les matières solubles peuvent entraîner une contamination radioactive si la capsule fuit.

2.1.2. Type de rayonnement

En général, les radionucléides peuvent émettre simultanément différents types de rayonnements. L'émission de particules sous forme de rayonnements α et β s'accompagne généralement d'une émission γ . Même dans le cas des émetteurs β purs, il faut tenir compte du rayonnement de freinage¹.

Lorsque les produits de désintégration des radionucléides sont aussi radioactifs, il faut également tenir compte des mêmes caractéristiques pour ces produits. Dans le cadre du présent rapport, la forme chimique et la structure du matériau contenant le radionucléide (par exemple chlorure de césium sous forme de sel granulaire) sont également importantes.

2.1.3. Caractéristiques physiques et chimiques des radionucléides

Les principales caractéristiques de certains radionucléides contenus dans les sources scellées sont présentées en détail ci-dessous.

Radium

Le radium 226 appartient à la famille radioactive de ^{238}U ; il a une très longue période (1 600 ans) et est un puissant émetteur alpha avec un faible niveau d'énergie gamma. Il se désintègre par émission alpha en ^{222}Rn , un gaz rare d'une période de 3,6 jours. Avant de se terminer par l'isotope stable ^{206}Pb , la chaîne de désintégration radioactive engendre huit produits de désintégration, dont quatre émetteurs alpha. Chaque atome de ^{226}Ra qui se désintègre donne ainsi naissance à cinq particules alpha. De nombreux photons gamma et des particules bêta de haute et de faible énergie sont également émis au cours de la désintégration. Une source au radium contient toujours des produits de filiation, en plus du parent ^{226}Ra . Sa constante gamma est donc relativement élevée [11].

La gestion des anciennes sources médicales de radium est donc problématique, car elles furent souvent en raison de la suppression interne créée par la désintégration du ^{226}Ra qui donne du radon et du gaz hélium. La petite taille des sources empêche le marquage, ce qui donne aux sources radioactives scellées l'apparence trompeusement inoffensive d'un petit morceau de métal lisse. La valeur apparente élevée de ces petites sources, souvent contenues dans des capsules en platine, augmente le risque de vol.

Le radium est un métal alcalino-terreux très réactif, qui réagit même avec l'azote. Il est donc toujours utilisé dans les sources radioactives sous forme de sels, lesquels peuvent être des bromures, des chlorures, des sulfates ou des carbonates. Tous sont solubles dans l'eau en quantités pouvant entraîner des problèmes radiologiques. Dans l'organisme, le radium se comporte comme le calcium, ce qui signifie qu'il se concentre dans les os. C'est pour toutes ces raisons qu'il n'est plus considéré comme un radionucléide idéal pour utilisation dans des sources scellées.

Cobalt

Le cobalt est un élément métallique qui n'a qu'un isotope stable : le ^{59}Co . Lorsqu'on met des petits cylindres de cobalt naturel dans un réacteur nucléaire, les noyaux absorbent les neutrons thermiques pour donner du ^{60}Co , un radionucléide d'une période de 5,27 ans. Le cobalt 60 subit une désintégration bêta (émission d'un électron et d'un neutrino) et émet deux rayons gamma à chaque désintégration : l'un à 1,173 MeV, l'autre à 1,333 MeV, et se désintègre finalement en ^{60}Ni , un isotope stable. Les sources au cobalt 60 sont produites en tant que sources de haute activité spécifique pour la téléthérapie et la

¹ **Rayonnement de freinage** : rayonnement émis par le ralentissement des particules faiblement chargées, comme les rayons X produits lorsque les électrons d'un accélérateur sont arrêtés par une cible métallique.

radiographie industrielle et des sources industrielles pour les irradiateurs et d'autres applications. Les sources de haute activité spécifique sont de petites pastilles métalliques (généralement des cylindres de 1 mm de diamètre et de hauteur) produites dans des réacteurs nucléaires spécialisés à haut flux.

Le cobalt est couramment utilisé dans les sources radioactives scellées, car il se traduit par l'activité spécifique la plus élevée pour la source. Le ^{60}Co se présente habituellement sous forme de disques minces ou de petites pastilles cylindriques ou encore de bâtonnets soudés dans des capsules en acier inoxydable. Le cobalt n'est ni soluble dans l'eau ni stable dans l'air, mais une fine couche d'oxyde se forme à sa surface et pourrait entraîner une contamination si le cobalt non protégé est manipulé. C'est pour cette raison que le cobalt utilisé dans les sources radioactives est nickelé avant l'activation [20].

Césium

Le césium 137 est produit par fission de noyaux d'uranium suivie d'une séparation chimique du césium du combustible nucléaire irradié ou des cibles. La plupart des installations qui traitent (retraitent) chimiquement le combustible nucléaire irradié pour récupérer l'uranium et le plutonium laissent du césium dans le flux de déchets. Le césium est en fait composé de quatre isotopes : le ^{133}Cs (stable), le ^{134}Cs (de période deux ans), le ^{135}Cs (de période 2,3 millions d'années) et le ^{137}Cs (de période 30 ans). Le césium 137 est généralement considéré comme un émetteur gamma d'énergie moyenne même si la désintégration bêta du $^{137}\text{Ba}^m$ produit des photons gamma de 662 keV d'énergie.

C'est un élément métallique alcalin très réactif, semblable au potassium et au sodium. Compte tenu de sa forte réactivité, il ne peut être utilisé que comme composé chimique dans les sources radioactives scellées. Le ^{137}Cs est habituellement fourni sous forme de chlorure de césium, un sel cristallin (chimiquement et structurellement lié au sel de table, le chlorure de sodium) qui peut être produit sous différentes formes, allant de blocs de l'ordre du centimètre à de la poudre, comme il est utilisé dans la fabrication des sources radioactives au chlorure de césium. Après pressage à froid pour former une pastille à l'intérieur d'un réceptacle en acier inoxydable en forme de dé à coudre, ce réceptacle est placé dans une capsule protectrice aussi en acier inoxydable qui est soudée pour former l'enceinte intérieure, et une deuxième enveloppe toujours en acier inoxydable est soudée sur la première pour former la source scellée au chlorure de césium radioactif elle-même. Les sources radioactives au chlorure de césium sont produites à environ 200 °C, car celui-ci est hygroscopique.

Il est soluble dans l'eau à température ambiante et peut donc être facilement dispersé s'il est retiré intentionnellement ou accidentellement de son conteneur. Si le conteneur en acier inoxydable devait fuir, le chlorure de césium pourrait se dissoudre dans l'eau et contaminer l'environnement immédiat. Il est très réactif dans l'environnement, où il se lie aux surfaces et migre même dans le béton. Dans l'organisme, il se disperse partout où va l'eau et contamine tout l'organisme.

Un moyen de réduire les problèmes dus à la très grande solubilité du chlorure de césium dans l'eau est de remplacer directement la poudre de chlorure de césium par un autre composé contenant du ^{137}Cs . Un procédé approprié comprend l'évaporation et l'émaillage dans des coupelles en alumine frittée, des pastilles de « pollucite » frittées (aluminosilicate de césium $\text{Cs}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) ou des pastilles et des barres de céramique. Le radionucléide est pratiquement insoluble dans l'eau sous ces formes, mais son activité spécifique est fortement réduite.

On peut aussi diminuer la solubilité et la dispersibilité en incorporant le ^{137}Cs dans le ciment par ajout de pâte de ciment et de matériaux de remplissage. Cette approche a comme avantage un traitement à basse température et, si on choisit judicieusement la phase d'ajout de ciment, une faible solubilité dans l'eau. Cependant, la dilution associée à la fabrication du ciment limite l'activité spécifique que l'on peut atteindre. En outre, le produit reste un solide fragile qui pourrait se dégrader sous l'effet des rayonnements, ce qui signifie que cette approche ne réduit pas la dispersibilité potentielle du césium lors d'une explosion, mais présente des avantages pour l'immobilisation à grande échelle de déchets contenant du ^{137}Cs .

Strontium

Le strontium est un métal réactif que l'on trouve généralement sous forme de chlorure, de nitrate, d'oxyde ou de titanate dans les sources. Il possède quatre isotopes stables, le strontium 84, le strontium 86, le strontium 87 et le strontium 88, ce dernier étant le plus abondant dans la nature (82,6 %). Le radionucléide ^{90}Sr est un produit de fission obtenu dans 5,8 % des fissions thermiques d' ^{235}U et 2 % des fissions thermiques de ^{239}Pu . Il subit une désintégration bêta (0,546 MeV) avec une période de 28,78 ans en ^{90}Y , qui subit lui-même une désintégration bêta d'énergie assez élevée (2,28 MeV) avec une période de 2,67 jours.

Le ^{90}Sr est généralement utilisé comme titanate sous forme de céramique. Pour certaines applications médicales, le composé de strontium est incorporé à une plaque d'argent revêtue d'une couche de 0,1 mm de palladium. Pour d'autres applications, il peut être incorporé dans une céramique, une microbille en verre ou une feuille d'argent laminée.

Le strontium 90 est produit dans les réacteurs de puissance ou des réacteurs de production d'isotopes. Il n'émet pas de rayons gamma pénétrants, ce qui signifie qu'en cas de contamination, seule une exposition externe est à craindre s'il se dépose sur la peau. Les principales préoccupations sont les expositions internes en raison des émissions bêta à haute énergie et du fait que le strontium appartient au même groupe chimique que le calcium, de sorte que l'organisme humain concentre le strontium ingéré dans les os où il reste essentiellement en permanence au lieu d'être éliminé par les fonctions habituelles de l'organisme. Toutefois, les sources au ^{90}Sr de haute activité produisent un rayonnement de freinage conséquent en bloquant les électrons de haute énergie émis par désintégration nucléaire. Ce rayonnement peut même avoir des effets déterministes sur la santé si l'activité de la source est très élevée (un tel incident s'est produit en 2002 en Géorgie avec un GTR).

Iridium

L'iridium, l'un des deux métaux les plus denses (22,42 g/cm³, comme l'osmium), est très dur, cassant, et difficile à usiner. Il est en outre très résistant aux réactions chimiques et a un point de fusion élevé (supérieur à 2 400 °C) [20]. L'iridium naturel, que l'on trouve sous forme d'alliages de platine et dans les minerais de nickel, est constitué de 37 % d' ^{191}Ir et 63 % d' ^{193}Ir . Les sources de rayonnement d'iridium 192 sont utilisées en gammagraphie (par exemple dans l'inspection non destructive des tuyaux) et en curiethérapie.

Elles sont fabriquées par irradiation d'iridium naturel dans un réacteur nucléaire. L'iridium 191 peut capter un neutron pour donner de l' ^{192}Ir qui a une période de 73,83 jours et une probabilité de 95 % de se désintégrer par décroissance bêta en ^{192}Pt et d'émettre des rayons gamma et une probabilité de 5 % de se décomposer par capture d'électrons pour former de l' ^{192}Os . Lors de la désintégration en ^{192}Pt , en moyenne 2,33 rayons gamma sont émis avec des énergies allant de 135 keV à 1,378 MeV, et une énergie moyenne de 380 keV.

Les sources d'iridium se présentent généralement sous forme de fils ou de piles de disques minces d'aluminium plutôt que de granulés en vrac, de bâtonnets ou de poudre. D'une manière générale, les sources à l' ^{192}Ir usées peuvent être retournées aux fabricants et aux distributeurs ou entreposées pour désintégration compte tenu de leur période relativement courte. Ainsi, bien que leur stockage définitif ne constitue pas un problème, la courte période de l' ^{192}Ir oblige les utilisateurs à les remplacer fréquemment, ce qui signifie qu'il y a toujours de nombreuses sources d' ^{192}Ir en cours de transport et d'entreposage à tout moment.

Américium

L'américium est un élément transuranien de la famille des actinides sans isotope stable. À l'instar des autres actinides, il s'oxyde assez facilement. L'américium est produit par captures successives de neutrons par l' ^{238}U , ses produits d'activation et ses produits de désintégration, pour donner du ^{241}Pu , qui

se désintègre en ^{241}Am dont la période est de 14,4 ans. L'américium est récupéré à partir des stocks de plutonium vieillissants dans lesquels il s'accumule par désintégration radioactive. L'américium 241 se désintègre avec une période de 432,7 ans en émettant une particule alpha. Celle-ci a une énergie moyenne de 5,465 MeV et est accompagnée d'un rayonnement X de 13,9 keV dans 43 % des désintégrations, d'un rayonnement X de 59,5 keV dans 36 % des désintégrations et sans rayonnement X dans les autres désintégrations. Le produit de désintégration, le ^{237}Np , est également radioactif, et a une période de 2 millions d'années. L'américium 241 est utilisé à la fois comme source de particules alpha et avec le béryllium comme source de neutrons (on parle de source à américium-béryllium ou Am-Be). Dans une source à l'Am-Be, certaines des particules alpha provenant de la désintégration de l'américium sont absorbées dans le béryllium, qui émet alors un neutron avec une énergie allant de 0 à environ 11 MeV, l'énergie moyenne étant d'environ 6 MeV. L'Am-Be produit environ 1 neutron pour 20 000 désintégrations alpha.

La « durée de vie active recommandée » d'une source à l'Am-Be est de 15 ans, après quoi les fabricants de la source recommandent qu'elle soit recertifiée (si elle est en bon état), réencapsulée (si la capsule est légèrement endommagée, mais que le modèle est toujours utilisé) ou recyclée (si le modèle n'est plus utilisé ou que la capsule est sérieusement endommagée, alors l'Am-Be brut peut être retiré et utilisé pour une nouvelle source).

Les caractéristiques chimiques de l'américium sont similaires à celles des métaux des terres rares. L' ^{241}Am est normalement utilisé sous forme d'oxyde dans les sources scellées. Pour les sources de neutrons, une fine poudre d'oxyde est mélangée à de la poudre de béryllium et frittée en un produit de type céramique, qui est stable dans l'air et dont l'américium n'est pas facilement soluble dans l'eau. Lorsqu'il est utilisé comme source de rayonnement gamma à faible énergie, une petite fenêtre est pratiquée dans la capsule en acier inoxydable afin que les photons gamma puissent être émis sans atténuation inutile [20].

Pour les détecteurs de fumée et les paratonnerres, l'américium peut être scellé dans une seule enveloppe (feuille métallique) ou déposé sur un support céramique et vitrifié.

Californium

Le californium est un élément de la famille des actinides sans isotope stable. Il est produit par captures successives de neutrons dans des cibles d'actinides. Le californium 252 a une période de 2,645 ans et se désintègre par fission spontanée 3,1 % du temps et par désintégration alpha dans les 96,9 % restants. Les fissions libèrent des neutrons, et le ^{252}Cf est donc une source de neutrons très intense ($2,3 \times 10^{12}$ neutrons par seconde par gramme). Étant donné qu'un noyau d' ^{238}U doit absorber 14 neutrons sans subir d'autres réactions qui réduisent le nombre de nucléons pour produire un noyau de ^{252}Cf , le californium est produit en très petites quantités.

Sélénium

Le sélénium est un élément volatil, réactif et corrosif qui ressemble chimiquement au soufre et forme des composés extrêmement toxiques. Il a une densité moyenne ($4,3 \text{ g/cm}^3$ à $4,8 \text{ g/cm}^3$) et fond à $217 \text{ }^\circ\text{C}$. Le sélénium a plusieurs isotopes naturels : ^{74}Se (0,89 %), ^{76}Se (9,36 %), ^{77}Se (7,63 %), ^{78}Se (23,78 %), ^{80}Se (49,61 %), et ^{82}Se (8,73 %). Le sélénium 75 se désintègre par capture d'électron avec une période de 119,8 jours en ^{75}As stable, en émettant en moyenne 1,75 rayons gamma avec une énergie moyenne de 215 keV chacun et une énergie maximale de 800 keV. Il est utilisé dans les caméras de radiographie pour les structures à parois minces. Le sélénium 75 est obtenu par irradiation de l'isotope naturel ^{74}Se dans un réacteur nucléaire. Le dioxyde de sélénium s'oxyde facilement et est très soluble dans l'eau. Le sélénium a une toxicité chimique très élevée et un niveau moyen de radiotoxicité.

La poudre radioactive de ^{75}Se est pressée sous forme de pastilles et placée dans une capsule interne en titane soudée (ou en alliage de titane), elle-même placée dans une capsule externe en acier inoxydable soudée.

Iode

L'iode ^{125}I est normalement produite par irradiation alpha de l'antimoine par la réaction $^{123}\text{S}(\alpha, 2n)^{125}\text{I}$. Il a une période de 60 jours. L'iode se désintègre par capture d'électron avec émission de rayons X de faible énergie de 27 et 35 keV.

Les sources d'iode utilisées en curiethérapie contiennent généralement de l' ^{125}I absorbé sur une tige d'argent ou une microbille de résine échangeuse d'ions, soudée dans une capsule mince en titane. Lorsqu'elles sont utilisées à des fins industrielles, elles se présentent généralement sous forme d'une bille de résine active enfermée dans une capsule en acier inoxydable avec une fine fenêtre en titane.

Étant donné que la source est constituée d'un matériau actif absorbé sur un substrat, une partie de l'iode radioactif peut se volatiliser si la capsule est endommagée.

Plutonium

Le plutonium est un élément transuranien de la famille des actinides sans isotope stable. C'est un métal réactif blanc argenté qui s'oxyde facilement, prenant alors une teinte terne et plus foncée. Il est peu soluble dans l'eau pure, mais très vulnérable à l'action de l'eau salée et des acides halogénés. Le plutonium 238 est produit par absorption neutronique dans le ^{237}Np , lui-même produit par irradiation de l'uranium dans un réacteur, suivie de séparations chimiques. Il a une période de 87,7 ans et se décompose par désintégration alpha avec une énergie moyenne de 5,486 MeV. Son produit de désintégration est l' ^{234}U , un radionucléide naturel. La chaleur produite par la désintégration dans du ^{238}Pu relativement pur est telle qu'une sphère solide du matériau de la taille d'une balle de golf deviendra rouge brillant en raison du rayonnement thermique si elle n'est pas refroidie activement.

Le tableau 1 [19] présente les principales caractéristiques radiologiques de certains radionucléides émettant des rayonnements alpha/bêta/gamma.

TABLEAU 1. CARACTÉRISTIQUES DE CERTAINS RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS DE RAYONNEMENTS ALPHA/BÊTA/GAMMA COURAMMENT UTILISÉS DANS LES SOURCES RADIOACTIVES SCELLÉES [19]

Caractéristiques	^{60}Co	^{137}Cs	^{192}Ir	^{226}Ra	^{241}Am	^{90}Sr (^{90}Y)	^{75}Se	^{125}I
Période	5,27 ans	30 ans	74 jours	1 600 ans	433 ans	29 ans	120 jours	60 jours
Énergie alpha (MeV)	–	–	–	7,7	5,86	–	–	–
Énergie bêta maximale (MeV)	0,31	1,2	0,67	2,8	–	0,55 (2,3)	–	–
Énergie gamma (MeV)	1,17 1,33	0,66	0,32 0,47	Jusqu'à 2,4	0,06	–	Niveau moyen	0,03
Constante gamma ($\mu\text{Sv/h} \times \text{GBq}$ à 1 m)	360	86	140	220	4	3,5 (freinage)	39	39

Sources de neutrons

Les sources de neutrons contiennent principalement des radionucléides émetteurs alpha (^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu et ^{226}Ra) pour induire des réactions (α, n) avec les éléments légers, par exemple le béryllium, le bore, le lithium ou le fluor. Un noyau de béryllium ou de bore absorbera une particule alpha et émettra

un neutron avec une énergie allant de 0 à environ 11 MeV, et une moyenne d'environ 4 MeV. Les sources de neutrons les plus couramment utilisées sont les sources d'Am-Be, même si certaines sources au plutonium-béryllium (PuBe) ont été utilisées dans le passé. Les sources d'Am-Be, telles que celles utilisées en diagraphie pétrolière sont généralement formées par pressage à froid de mélanges d'oxyde d'américium (AmO_2) et de poudres de béryllium pour former une pastille qui est ensuite liée par diffusion à une bande métallique (pour les petites sources) ou scellée dans un récipient en acier inoxydable soudé.

Il a été démontré qu'une source de fission spontanée utilisant du ^{252}Cf pouvait remplacer des sources d'Am-Be. Le plutonium 238 est utilisé pour induire l'émission de neutrons rapides, tandis que l' ^{241}Am est largement utilisé pour d'autres applications. Le radium 226 est également utilisé dans les sources de neutrons ; cependant, il présente des problèmes dus au rayonnement gamma associé.

Le tableau 2 [17] présente les caractéristiques radiologiques des sources de neutrons les plus importantes.

TABLEAU 2. PRINCIPALES SOURCES DE NEUTRONS [17]

Source	Réaction nucléaire	Période	Production de neutrons 1/(TBq.s)	Énergie (MeV)
$^{226}\text{Ra-Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n) ^{12}\text{C}$	1 602 ans	$4,6 \times 10^8$	5
$^{239}\text{Pu-Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n) ^{12}\text{C}$	$2,44 \times 10^4$ ans	$4,8 \times 10^7$	4
$^{241}\text{Am-Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n) ^{12}\text{C}$	458 ans	$5,7 \times 10^7$	4
^{252}Cf	Fission spontanée	2,64 ans	$1,2 \times 10^{11}$	1

2.2. STRUCTURE ET CONCEPTION

Les formes et les dimensions des sources radioactives scellées varient en fonction des applications et de l'activité. Les paramètres géométriques sont importants dans le choix des méthodes appropriées pour le conditionnement, le transport, l'entreposage et le stockage définitif des sources retirées du service.

2.2.1. Sources gamma

La partie active de la source radioactive peut revêtir différentes formes. Pour les rayonnements bêta et gamma, elle peut prendre la forme de cylindres, de disques, de granulés, de plaques et de fils. La matière radioactive contenue dans les sources gamma se présente généralement sous forme solide faiblement soluble à l'exception du chlorure de ^{137}Cs des sources de haute activité, qui est facilement soluble. D'une manière générale, l'acier inoxydable ou, dans une moindre mesure, l'aluminium et le titane, sont utilisés pour la capsule des sources gamma. L'enveloppe protectrice de la source peut être constituée d'une ou plusieurs capsules (voir figure 1). La plupart des sources de haute énergie sont logées dans une double capsule alors que les sources de faible énergie sont logées dans une capsule métallique solide avec une fenêtre étroite. Dans les sources gamma de faible énergie, la matière radioactive est fixée en couche mince à la surface de la plaque (voir figure 2).

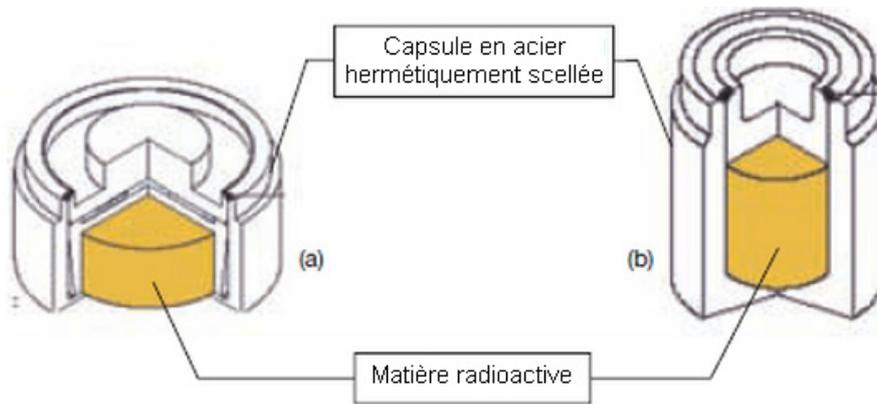


FIG. 1. Exemples de sources à double ou simple encapsulation : a) source courante à ^{241}Am en forme de disque et b) source courante cylindrique au ^{137}Cs

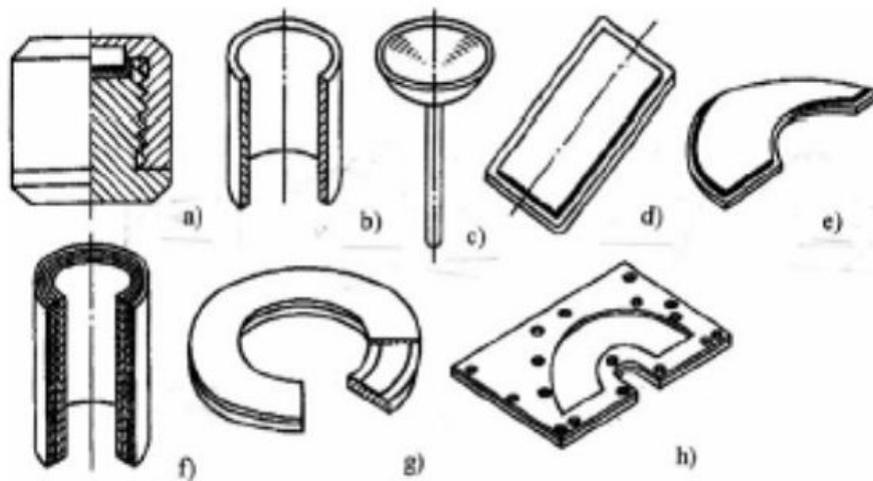


FIG. 2. Sources radioactives de surface : a) sources bêta au $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, au $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$, au $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$; b) source alpha au Pu ; c) source bêta au $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$; d) source alpha au Pu ; e) source bêta au ^{147}Pm ; f) source bêta au $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$; g) source de rayons X au ^{55}Fe ; h) sources bêta au $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, au $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$.

2.2.2. Sources alpha

En règle générale, les sources alpha comprennent un support en céramique ou en métal contenant des radionucléides tels que le ^{238}Pu , le ^{239}Pu , l' ^{241}Am , le ^{210}Po , le ^{237}Np ou le ^{226}Ra . Leurs dimensions peuvent varier considérablement. La figure 3 présente une source radioactive courante à ^{241}Am sous forme de feuille.

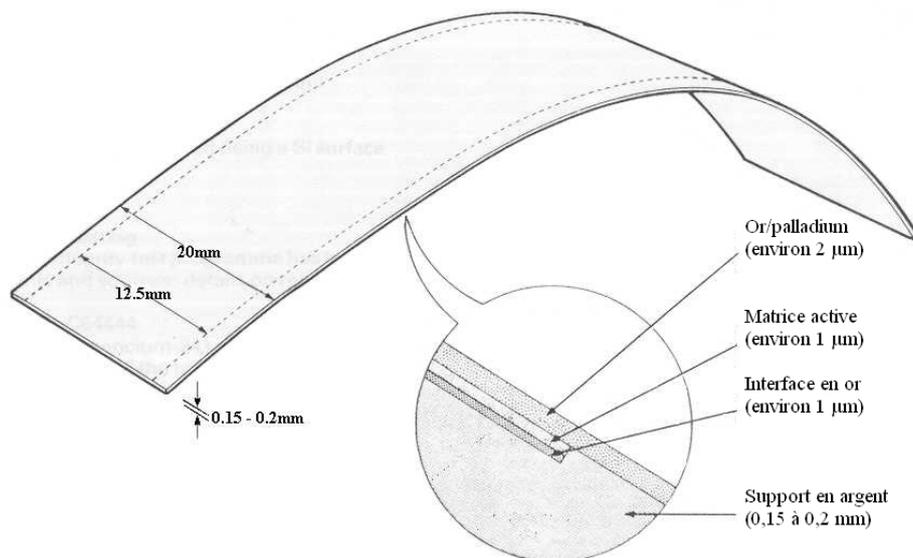


FIG. 3. Source radioactive émettrice alpha courante à l' ^{241}Am sous forme de feuille.

Certaines sources scellées alpha contiennent des matières radioactives en poudre ou sous forme liquide à l'intérieur de flacons et d'ampoules en verre ou en plastique. Leur manipulation, leur transport, leur conditionnement et leur entreposage exigent des précautions particulières. Les premières sources liquides au radium étaient scellées dans des flacons en verre (fig. 4) mais même si cette pratique a été abandonnée depuis de nombreuses années, ce genre de sources existe encore.



FIG. 4. Sources liquides au ^{226}Ra dans des flacons de verre.

2.2.3. Sources bêta

Une source bêta peut être soit une solide capsule métallique avec une fenêtre mince, soit un substrat inactif sur lequel est déposée la matière active, généralement recouverte d'une couche inactive très mince.

Les sources au nickel 63 sont constituées d'un substrat sous la forme d'un tube ou d'un fil métallique, sur lequel est déposée une couche de matière radioactive par un processus électrochimique. Leur longueur ne dépasse généralement pas 40 mm.

Les sources au carbone 14 sont constituées de pellicules polymères (polyméthylméthacrylate) collés sur une couche d'aluminium. Ces pellicules ne dépassent pas habituellement 70 mm de longueur et 1 mm d'épaisseur.

Les sources au strontium 90 sont généralement constituées d'une matrice en céramique encapsulée dans de l'acier, mais les applications oculaires de ^{90}Sr sont basées sur la technologie des feuilles d'argent.

Pour les sources au ^{85}Kr , la matière radioactive est un gaz rare.

2.2.4. Sources de neutrons

Presque toutes les sources de neutrons contiennent un radionucléide émetteur alpha mélangé à du béryllium ou à une poudre d'un autre métal léger pressé et enveloppé d'une double couche d'acier inoxydable. La longueur de ces sources peut varier de 3 à 40 mm.

2.3. DIMENSIONS

Le tableau 3 [21] donne quelques exemples de dimensions de sources radioactives scellées.

TABLEAU 3. DIMENSIONS COURANTES DE CERTAINES SOURCES SCELLÉES [21]

Sources scellées	Catégorie	Dimensions
Source de téléthérapie au ^{60}Co	1	Cylindre de 20 mm de diamètre × 30 mm de longueur
Source de stérilisation gamma au ^{60}Co	1	11 mm de diamètre × 450 mm de longueur
GTR à source de ^{90}Sr	1	Jusqu'à 100 mm de diamètre × 200 mm de longueur
Sources de gammagraphie industrielle	2	Jusqu'à 7 mm de diamètre × 15 mm de longueur ; résidu souple jusqu'à 200 mm de longueur
Sources de curiethérapie à haut débit de dose à téléchargement différé	2	<i>Sources modernes :</i> Jusqu'à 3 mm de diamètre × 15 mm de longueur ; bouts souples de longueur pouvant aller jusqu'à 300 mm <i>Sources plus anciennes :</i> Forme sphérique : environ 3 mm de diamètre ; matière radioactive : ^{137}Cs
Sources gamma de haute énergie pour jauges industrielles	3 ou 4	Capsules généralement de forme cylindrique : 3 à 12 mm de diamètre × 5 à 15 mm de longueur
Sources de neutrons pour jauges industrielles	3 ou 4	3 ou 4 à 6 mm de diamètre × 12 mm de longueur ou 8 à 20 mm × 12 à 30 mm de longueur
Sources gamma et sources de neutrons pour diagraphie pétrolière	2 ou 3	<i>Sources gamma :</i> 8 à 20 mm de diamètre × 15 à 40 mm de longueur <i>Sources de neutrons :</i> 15 à 25 mm de diamètre × 25 à 60 mm de longueur
Sources fixes de basse énergie pour jauges industrielles	4	10 à 50 mm de diamètre × 7 à 15 mm de hauteur

TABLEAU 3. DIMENSIONS COURANTES DE CERTAINES SOURCES SCÉLÉES [21] (suite)

Sources scellées	Catégorie	Dimensions
Implant permanent et sources de grains radioactifs à faible débit de dose en curiethérapie	5	Moins de 1 mm de diamètre × moins de 5 mm de longueur
Plaques ophtalmiques	5	Moins de 1 mm de diamètre × moins de 5 mm de longueur
Sources gamma de basse énergie pour analyses	5	3 à 15 mm de diamètre × 7 à 10 mm de hauteur
Sources d'étalonnage et de référence	5	Diverses tailles et formes

Il existe des applications particulières où les sources sont de très grande taille, par exemple les éliminateurs d'électricité statique qui ont plus de 1 m de long. La configuration géométrique de certains de ces dispositifs est assez complexe en ce sens que la matière brute radioactive est répartie sur la surface de la structure.

2.4. CONDITION PHYSIQUE

Certaines sources radioactives scellées peuvent fuir et doivent être testées à des intervalles réguliers recommandés par le fabricant et/ou selon les prescriptions de l'organisme national de réglementation. Ces essais doivent être effectués par un personnel suffisamment bien formé. La référence de l'Organisation internationale de normalisation [22] donne des orientations sur les méthodes d'essai d'étanchéité.

Les sources qui fuient sont considérées comme retirées du service et immédiatement traitées comme telles pour une gestion sûre. Par exemple, les anciennes sources au radium, encapsulées dans des ampoules de platine ou de verre, peuvent fuir. L'augmentation de la pression interne due à l'accumulation de produits de désintégration du ^{226}Ra est un problème de sûreté fréquent. Les sources qui fuient ou sont endommagées doivent faire l'objet d'une attention particulière pendant le conditionnement et l'entreposage.

3. CATÉGORISATION ET CLASSIFICATION

La catégorisation ou classification est une approche utilisée principalement lorsque le nombre d'éléments considérés (objets ou idées) est élevé, pour faciliter leur gestion en diminuant ce nombre. Elle se fait en sélectionnant et en structurant les principales caractéristiques (critères). Les sources radioactives scellées sont utilisées à des fins diverses et contiennent un large éventail de radionucléides et des quantités variées de matières radioactives. Dans ce cas particulier, la catégorisation est essentiellement basée sur les caractéristiques du rayonnement et le risque que représente la source pour les êtres humains et l'environnement. Certains risques associés aux sources radioactives sont brièvement présentés dans l'annexe au présent document.

3.1. JUSTIFICATION DE LA CATÉGORISATION DES SOURCES RADIOACTIVES

La catégorisation ou la classification des sources radioactives peut être utile à n'importe quelle étape du cycle de vie d'une source, de la phase initiale de production et d'utilisation au stockage définitif. Un système de catégorisation des sources est également nécessaire pour permettre de classer et de regrouper les sources et leurs applications en fonction des risques, ce qui à son tour est directement pertinent pour les questions suivantes :

- *Les mesures réglementaires.* La catégorisation fournit une base logique et transparente pour un système de notification, d'enregistrement, d'autorisation et d'inspections tenant compte des risques. Elle offre également une base permettant de proportionner l'allocation des ressources humaines et financières aux risques liés à l'utilisation de la source.
- *Les mesure de sûreté.* La classification fournit une base tenant compte des risques pour la détermination des mesures de sûreté à appliquer pendant le cycle de vie de la source scellée (de son étape d'utilisation à son stockage définitif comme source retirée du service). Elle permet en outre d'évaluer les dangers potentiels associés aux différents types de sources.
- *Les options de gestion.* La catégorisation aide à planifier et à concevoir les installations de conditionnement et d'entreposage et à prendre une décision sur une voie possible de stockage définitif pour une source.
- *Les mesures de sécurité.* La classification fournit une base tenant compte des risques pour aider à déterminer les mesures de sécurité, en reconnaissant que d'autres facteurs sont importants (par exemple, les menaces pesant sur des installations/sources particulières).
- *Le registre national des sources.* La classification permet d'optimiser les décisions relatives aux catégories de sources et au niveau de détail à inclure dans les rapports nationaux.
- *Les contrôles d'importations/exportations.* La catégorisation aide à optimiser les décisions concernant les sources pouvant être soumises à des contrôles d'importation et d'exportation.
- *L'étiquetage des sources.* La classification permet d'optimiser les décisions ayant trait aux sources sur lesquelles seront apposées des étiquettes appropriées (en plus du trèfle) pour avertir du danger radiologique.
- *La réparation et la conduite des interventions d'urgence.* La classification permet de faire correspondre les plans de préparation et de conduite des interventions d'urgence en cas d'accident à la catégorie de la source.
- *L'établissement des priorités pour la reprise du contrôle des sources orphelines.* La catégorisation permet d'optimiser les décisions relatives aux aspects sur lesquels les efforts doivent être concentrés pour reprendre le contrôle des sources orphelines.
- *La communication avec le public.* Fournir un fondement pour expliquer le danger relatif des événements mettant en jeu des sources radioactives.

La catégorisation des sources radioactives sert à fournir une base fondamentale et harmonisée au niveau international pour une prise de décisions en connaissance des risques. Divers systèmes de catégorisation des sources ont été élaborés par des organisations internationales, mais à des fins de prise de décisions différentes. Les trois principaux systèmes internationaux de catégorisation élaborés pour éclairer les stratégies de gestion des sources radioactives retirées du service sont décrits ci-dessous. En outre, le système de classification des déchets de l'AIEA est décrit à la section 12 à l'intention des États Membres qui sont en train d'étudier des options de stockage définitif.

Les États Membres qui n'ont pas de système de classification (catégorisation) des sources peuvent élaborer leur propre système sur la base des orientations internationales pertinentes ou adopter les systèmes internationaux de catégorisation des sources existants pour répondre à des exigences nationales particulières.

3.2. SYSTÈME DE CATÉGORISATION DES SOURCES DE L'AIEA

Consciente de la nécessité d'une approche fondée sur les risques pour le contrôle réglementaire des sources radioactives, l'AIEA a proposé un système de catégorisation des sources radioactives et des pratiques dans les NFI [11] et dans le Guide de sûreté RS-G.1.9 [23], basé sur le document AIEA-TECDOC-1344 [24].

Le tableau 2 de l'annexe I de la référence [23] présente des exemples du large éventail de radionucléides et d'activités des sources radioactives utilisées à des fins bénéfiques dans le monde entier. Étant donné l'importance primordiale de la santé humaine, le système de catégorisation est essentiellement basé sur les effets déterministes potentiels des sources sur la santé, compte tenu des propriétés physiques et des applications particulières de la source. Ce système repose donc sur la notion de « sources dangereuses » – le danger étant quantifié par des « valeurs D »². La valeur D correspond à l'activité spécifique du radionucléide contenu dans une source radioactive qui, si elle n'est pas soumise à un contrôle, pourrait provoquer des effets déterministes graves tels qu'une exposition externe à une source non protégée et à une exposition interne en cas de dispersion de la matière brute (voir l'annexe II de la référence [24]). Pour chaque pratique et chaque radionucléide utilisés, l'activité de la source en TBq est divisée par la valeur « D » particulière du radionucléide correspondant en TBq, ce qui donne le rapport normalisé sans dimension d'A/D.

Le tableau 4 (tableau 1 de la référence [23]) présente la catégorisation finale des applications particulières de la source ; et une comparaison des catégories, basée uniquement sur le rapport A/D à celles attribuées aux pratiques, figure à l'appendice I de la référence [23]. Les sources de catégorie 1 présentent le risque le plus élevé dans la gestion des sources scellées, tandis que celles de catégorie 5 présentent le risque le plus faible.

Si une pratique met en jeu le regroupement de sources en un seul lieu d'entreposage ou d'utilisation où elles sont côte à côte, comme dans des installations d'entreposage, des processus de fabrication ou des moyens de transport, l'activité totale peut être intégrée et traitée comme s'il s'agissait d'une source aux fins de l'attribution d'une catégorie. Par conséquent, l'activité totale intégrée du radionucléide peut être divisée par la valeur D appropriée et le rapport A/D calculé comparé aux rapports A/D figurant dans la colonne de droite du tableau 4, ce qui permet d'attribuer une catégorie à la pratique sur la base de

² Les valeurs D ont été initialement dérivées dans le contexte de la préparation aux situations d'urgence [38] pour établir un point de référence correspondant à une « source dangereuse » [37] sur l'échelle des risques pouvant résulter de sources non contrôlées.

l'activité. Si des sources contenant plusieurs radionucléides sont regroupées, on peut utiliser la somme des rapports A/D pour déterminer la catégorie conformément à la formule :

$$\text{Somme des rapports } A/D = \sum_n = \sum_i A_{i,n}/D_n$$

où

$A_{i,n}$ = activité de chaque source i du radionucléide n .

D_n = valeur D pour le radionucléide n .

Dans chaque cas, il faudrait reconnaître qu'il pourrait s'avérer nécessaire de prendre d'autres facteurs en considération pour l'attribution d'une catégorie. Par ailleurs, lorsque l'on considère le regroupement de sources, il importe de noter que la pratique peut changer, par exemple la « fabrication » d'une jauge de niveau est une pratique différente de l'« utilisation » de cette jauge.

TABLEAU 4. CATÉGORIES RECOMMANDÉES POUR LES SOURCES [23] UTILISÉES DANS LES PRATIQUES COURANTES

Catégorie	Catégorisation des pratiques courantes ^a	Rapport d'activités ^b (A/D)
1	Générateurs thermoélectriques à radio-isotopes (GTR) Irradiateurs Sources de téléthérapie Sources fixes de téléthérapie multifaisceaux (scalpel gamma)	$A/D \geq 1000$
2	Sources de gammagraphie industrielle Sources de curiethérapie à débit de dose élevé/moyen	$1000 > A/D \geq 10$
3	Jauges industrielles fixes contenant des sources de haute activité Sondes de diagraphie	$10 > A/D \geq 1$
4	Sources de curiethérapie à faible débit de dose (sauf plaques ophtalmiques et implants permanents) Jauges industrielles sans source de haute activité Ostéodensitomètres Éliminateur d'électricité statique	$1 > A/D \geq 0,01$
5	Sources de curiethérapie à faible débit de dose (plaques ophtalmiques et implants permanents) Dispositifs à fluorescence X Dispositifs à capture d'électrons Spectrométrie Mössbauer Sources de contrôle pour la tomographie à émission de positons (PET)	$0,01 > A/D \geq$ Niveau d'exemption ^c /D

^a En tenant compte du fait que des facteurs autres que le rapport A/D ont été pris en considération.

^b Cette colonne peut servir à déterminer la catégorie d'une source uniquement sur la base du rapport A/D. Cela peut être approprié si par exemple la pratique n'est pas connue ou indiquée, si les sources ont une courte période et/ou ne sont pas scellées, ou si des sources sont regroupées.

^c Les quantités correspondant à un niveau d'exemption figurent dans l'appendice complémentaire I des NFI [11].

3.3. REGROUPEMENT DES SOURCES PAR L'AIEA AUX FINS DE LA SÉCURITÉ

Les sources non sécurisées ont été à l'origine de décès et de blessures graves dans de nombreuses régions du monde. L'AIEA a publié un certain nombre de rapports décrivant les conséquences sur la santé humaine et les pertes économiques des incidents et des accidents dus à des sources non contrôlées.

Avant le 11 septembre 2001, la sécurité des sources radioactives était surtout assurée par des mesures visant à les protéger contre l'accès par un personnel insuffisamment formé ou contre les tentatives de vol à des fins financières. Cette approche a depuis été modifiée pour tenir compte également de la nécessité d'empêcher l'accès à certaines sources par des individus cherchant délibérément et par malveillance à provoquer une exposition aux rayonnements ou la dispersion de matières radioactives.

Pour assurer la sécurité des sources radioactives, des mesures doivent être mises en œuvre pour empêcher l'accès non autorisé à celles-ci à toutes les étapes de leur cycle de vie, ainsi que la perte, le vol et le transfert non autorisé de ces sources. Pour garantir leur sûreté, l'exposition aux rayonnements provenant des sources, à la fois directement et à la suite d'incidents, doit être contrôlée afin que la probabilité de dommages attribuables à cette exposition soit extrêmement faible. La sûreté et la sécurité des sources sont intimement liées et de nombreuses mesures visant à promouvoir l'une renforceront également l'autre.

L'AIEA a publié en 2009 le Guide d'application – Sécurité des sources radioactives [25], qui tient compte de l'approche de sécurité globale que certains États peuvent avoir utilisée comme référence pour concevoir leurs régimes de sécurité actuels. Ce guide propose une approche graduée de la sécurité en utilisant un ensemble de niveaux de sécurité et les fonctions de sécurité de dissuasion, de détection, de retardement, d'intervention et de gestion de la sécurité. La publication a été harmonisée avec les catégories de sources radioactives de l'AIEA [23], les prescriptions des NFI [11] et celles du Code de conduite [14]. Trois niveaux de sécurité (A, B et C) ont été établis pour permettre de définir précisément la performance du système de sécurité de manière graduée. Le niveau A correspond au degré de sécurité le plus élevé et les deux autres à des degrés progressivement décroissants.

À chaque niveau de sécurité correspond un but. Celui-ci définit le résultat général que le système de sécurité devrait être en mesure d'obtenir pour un niveau de sécurité donné. Voici les buts qui ont été définis :

- Niveau de sécurité A : *prévenir* l'enlèvement non autorisé d'une source.
- Niveau de sécurité B : *réduire au minimum la probabilité* d'un enlèvement non autorisé d'une source.
- Niveau de sécurité C : *réduire la probabilité* d'un enlèvement non autorisé d'une source.

Les actes malveillants peuvent mettre en jeu soit un enlèvement non autorisé d'une source soit un sabotage. Si les buts de sécurité ne concernent que l'enlèvement non autorisé, leur réalisation permettra de réduire les chances de succès d'un acte de sabotage. Les systèmes de sécurité qui atteignent les buts énumérés ci-dessus donneront une certaine capacité (quoique limitée) de détecter un acte de sabotage et d'intervenir.

Un niveau de sécurité approprié devrait être attribué à chaque catégorie de sources radioactives définie à la section 3.2³. Les mesures de sécurité pour les sources de catégorie 1 devraient répondre aux buts du niveau de sécurité A, celles relatives aux sources de catégorie 2 aux buts du niveau de sécurité B et celles ayant trait aux sources de catégorie 3 aux buts du niveau de sécurité C.

Les NFI [11] présentent des prescriptions générales pour la sécurité des sources radioactives. Dans le cadre de ce guide, on considère que ces mesures de contrôle assurent un niveau de sécurité suffisant pour les sources radioactives des catégories 4 et 5, mais qu'il faudrait appliquer les mesures renforcées qui y sont indiquées aux sources radioactives des catégories 1, 2 et 3 pour réduire la probabilité d'actes

³ Les orientations énoncées ici au conditionnel, ou simplement au présent de l'indicatif, constituent les bonnes pratiques, représentent l'opinion d'experts mais ne sont pas des recommandations internationales consensuelles sur la manière de satisfaire aux exigences pertinentes.

malveillants mettant en jeu ces sources. En outre, l'organisme de réglementation pourrait, compte tenu de la menace nationale, souhaiter renforcer la sécurité des sources des catégories 4 et 5 dans des circonstances appropriées. L'utilisation malveillante des sources radioactives pourrait ne pas nécessairement mettre en jeu des sources classées dans la plus haute catégorie de ce système de catégorisation. Par exemple, la plupart des sources de catégorie 1 seront protégées et gardées dans des dispositifs ou des installations fixes et toute tentative d'enlèvement de ces sources demandera du temps et pourrait exposer les agresseurs à un niveau de rayonnements sensiblement nuisible. Il est donc possible que ceux-ci se concentreront sur les sources d'une catégorie inférieure, plus facilement accessibles, moins dangereuses à manipuler, portables, et plus faciles à dissimuler. L'affectation d'une source radioactive à un groupe de sécurité est plus efficace lorsqu'elle repose sur les résultats de l'évaluation des menaces. Cela permet, d'une part, une flexibilité et une spécificité accrues pour tenir compte de la variabilité des niveaux de menace et des environnements de sécurité dans les États Membres, d'autre part, différents choix de groupes de sécurité pour les sources aux différentes étapes de leur cycle de vie. Certains États Membres peuvent aussi effectuer des évaluations des menaces et de la vulnérabilité à l'échelle du pays et affecter les sources aux groupes de sécurité sur la base de ces évaluations.

Conformément au Code de conduite [14], chacune des catégories comprend les matières radioactives rejetées si l'une des sources du groupe fuit ou est brisée. La méthodologie de catégorisation permet aussi de regrouper les sources en un seul endroit. Une des raisons pour lesquelles une source est classée dans un groupe de sécurité plus élevé pourrait être que l'évaluation de la menace particulière peut révéler que certaines installations abritant des sources ou certaines sources mobiles sont plus vulnérables à l'acquisition, même si elles ne sont pas des sources ayant l'activité la plus élevée.

3.4. CLASSIFICATION ISO DES SOURCES

La norme ISO 2919 [26] de l'Organisation internationale de normalisation établit un système de classification des sources scellées en fonction des performances d'essai et précise les exigences générales, les tests de performance, les essais de production, le marquage et la certification. Des prototypes de sources sont testés en ce qui concerne la température, la pression externe, les chocs, les vibrations et les perforations dans des classes de sévérité croissante [22]. Les sources destinées à une application doivent répondre aux critères minimums énoncés dans la norme.

La classification ISO des sources, qui est basée sur le type de rayonnement et l'application, distingue :

- Les sources gamma ;
- Les sources bêta ;
- Les sources alpha ;
- Les sources de neutrons ;
- Les autres sources à usage spécial (par exemple les sources gamma et les sources de neutrons pour la diagraphie).

Il conviendrait de noter que les sources émettent généralement des rayonnements mixtes : la désintégration radioactive s'accompagne de rayonnement, et les produits de filiation radioactifs de la désintégration sont souvent des émetteurs bêta. En outre, la conversion de l'énergie des particules (électrons) lors de l'absorption entraîne le freinage.

4. APPLICATIONS, DISPOSITIFS ET SOURCES SCÉLÉES ASSOCIÉES

Dans presque toutes les applications, les sources radioactives sont placées dans un conteneur blindé qui renferme également d'autres instruments ou un autre matériel mécanique, ou est associé à ceux-ci. Ce matériel est généralement appelé « dispositif » et la nature de celui-ci dépend de l'application. Dans de nombreux cas, le dispositif est également utilisé pour transporter la source scellée jusqu'à son lieu d'utilisation prévu. Il comprend généralement un blindage suffisant pour absorber le rayonnement à un niveau auquel il est inoffensif pour le public, ainsi qu'un « obturateur » dont l'ouverture permet de diriger un faisceau de rayonnement de la source sur le sujet.

La section suivante décrit certains dispositifs classiques ainsi que les sources associées utilisés dans diverses applications. La description des divers dispositifs est liée à la catégorisation des sources radioactives de l'AIEA [23]. Étant donné que celles-ci ont été largement utilisées à diverses fins dans le passé, il est important de tenir compte des applications historiques des sources ainsi que des dispositifs utilisés à l'époque.

4.1. DISPOSITIFS ET SOURCES DE CATÉGORIE 1

4.1.1. Générateurs thermoélectriques à radio-isotopes

Les GTR sont des dispositifs qui utilisent la chaleur de désintégration d'un radio-isotope par l'absorption du rayonnement de la source radioactive pour produire de l'électricité à l'aide d'un thermocouple. Les deux radionucléides le plus souvent utilisés sont le ^{90}Sr ($330\text{-}2,5 \times 10^4$ TBq) et le ^{238}Pu (1-10 TBq). Les sources mesurent jusqu'à 100 mm de diamètre, avec une longueur de 200 mm. Le strontium est utilisé sous forme de céramique au titanate (SrTiO_3) et est hermétiquement scellé dans une double capsule par soudage à l'argon. Plusieurs GTR utilisaient du ^{90}Sr sous forme de verre borosilicaté au strontium. La capsule est protégée contre les chocs externes par la coque épaisse du GTR faite d'acier inoxydable, d'aluminium et de plomb.

Le rayonnement principal est le rayonnement bêta, dont la portée est relativement courte, mais la source produit également un niveau élevé et dangereux de rayonnement gamma secondaire de freinage. La puissance habituellement générée peut aller de quelques watts à des dizaines de kilowatts, en fonction de l'activité et du radio-isotope. Il n'y a pas de pièces mobiles dans ces dispositifs qui sont conçus pour fonctionner sans surveillance pendant des dizaines d'années.

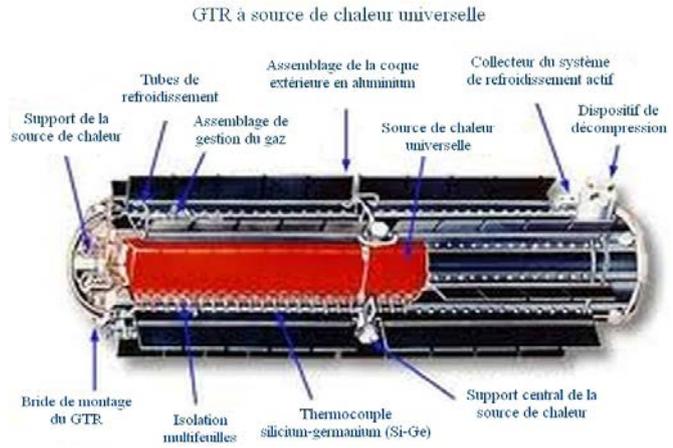
Il existe deux applications principales, à savoir les voyages spatiaux et la production d'électricité dans des régions éloignées. Des GTR ont été déployés assez largement par les États-Unis d'Amérique et l'ex-URSS dans la région arctique pour alimenter les phares et les balises de navigation.

La figure 5 a) présente le type de GTR produit en ex-URSS. Au total, plus de 1 000 GTR ont été produits dont environ 700 sont toujours en service. Un GTR fabriqué aux États-Unis d'Amérique est représenté à la figure 5 b).

De très petits GTR utilisant du ^{238}Pu étaient utilisés jusque dans les années 1970 dans les stimulateurs cardiaques pour fournir une alimentation à vie (fig. 6). Ils ont été rendus obsolètes par l'amélioration de la technologie de fabrication des piles et en raison de problèmes de sûreté et de réglementation. L'activité des sources est faible, ce qui signifie que ces dispositifs ne constituent pas un grand sujet de préoccupation.



a)



b)

FIG. 5. Générateurs thermoélectriques à radio-isotopes.



FIG. 6. Stimulateur cardiaque alimenté par un GTR.

Étant donné que ces dispositifs sont déployés dans des régions reculées, des personnes peuvent les déplacer, les acquérir à des fins illégales ou les démanteler pour récupérer la valeur d'épave de leur matériau de blindage. En outre, avec un changement de gouvernement et/ou la perte de documents, ces sources peuvent se retrouver abandonnées et oubliées jusqu'à ce qu'on les redécouvre un jour. Des satellites spatiaux équipés de GTR sont également revenus dans l'atmosphère terrestre, causant des inquiétudes sur la propagation de matières radioactives.

4.1.2. Irradiateurs

Unité de stérilisation ou irradiateur panoramique

Une unité de stérilisation gamma ou « irradiateur panoramique » gamma, n'est pas un dispositif à proprement parler. C'est un bâtiment blindé qui abrite un grand nombre de sources au ^{60}Co ou au ^{137}Cs (de l'ordre de 0,2 à 600 PBq) disposées en réseau. Le produit à soumettre à la stérilisation gamma est placé dans la zone protégée et exposé aux sources le temps nécessaire pour fournir la dose de rayonnement requise pour tuer les bactéries. Les applications comprennent la stérilisation d'articles médicaux (tels que

le matériel de suture et les gants), la conservation de denrées alimentaires et la réticulation de polymères pour modifier leurs propriétés. Il y a actuellement plus de 160 irradiateurs panoramiques en service dans le monde.

La taille des sources utilisées dans les irradiateurs varie, certaines étant de grande taille, d'autres de la taille d'un crayon. Ces sources sont installées dans de grandes enceintes dédiées et blindées, qui abritent soit une piscine d'eau profonde (fig. 7), soit une structure en plomb massif ou en béton pour protéger la source quand elle n'est pas utilisée (fig. 8). Lorsque la source est exposée, les débits de doses au sein de l'enceinte d'irradiation sont très élevés et il est possible de recevoir une dose mortelle en l'espace d'une minute. Par conséquent, ces installations ont de nombreuses caractéristiques de sûreté, basées sur les principes d'obsolescence, de défense en profondeur, de diversité et d'interdépendance des systèmes de sûreté.



FIG. 7. Entreposage en piscine de sources de catégorie 1.

Les sources utilisées dans les irradiateurs de stérilisation sont généralement placées dans une double capsule externe en acier inoxydable, contenant des pastilles de ^{60}Co . En règle générale, les dimensions de la capsule sont souvent de 11 mm de diamètre x 450 mm de longueur. Les modèles de source de stérilisation gamma au ^{60}Co les plus couramment utilisés dans les unités industrielles de stérilisation gamma du monde entier sont de type Nordion C188 (Canada) et REVISS RSL2089 (consortium international). D'autres fabricants produisent des sources de dimensions similaires, et il existe en outre une série d'autres types de modèles utilisés à la fois dans les irradiateurs industriels et les petits irradiateurs.

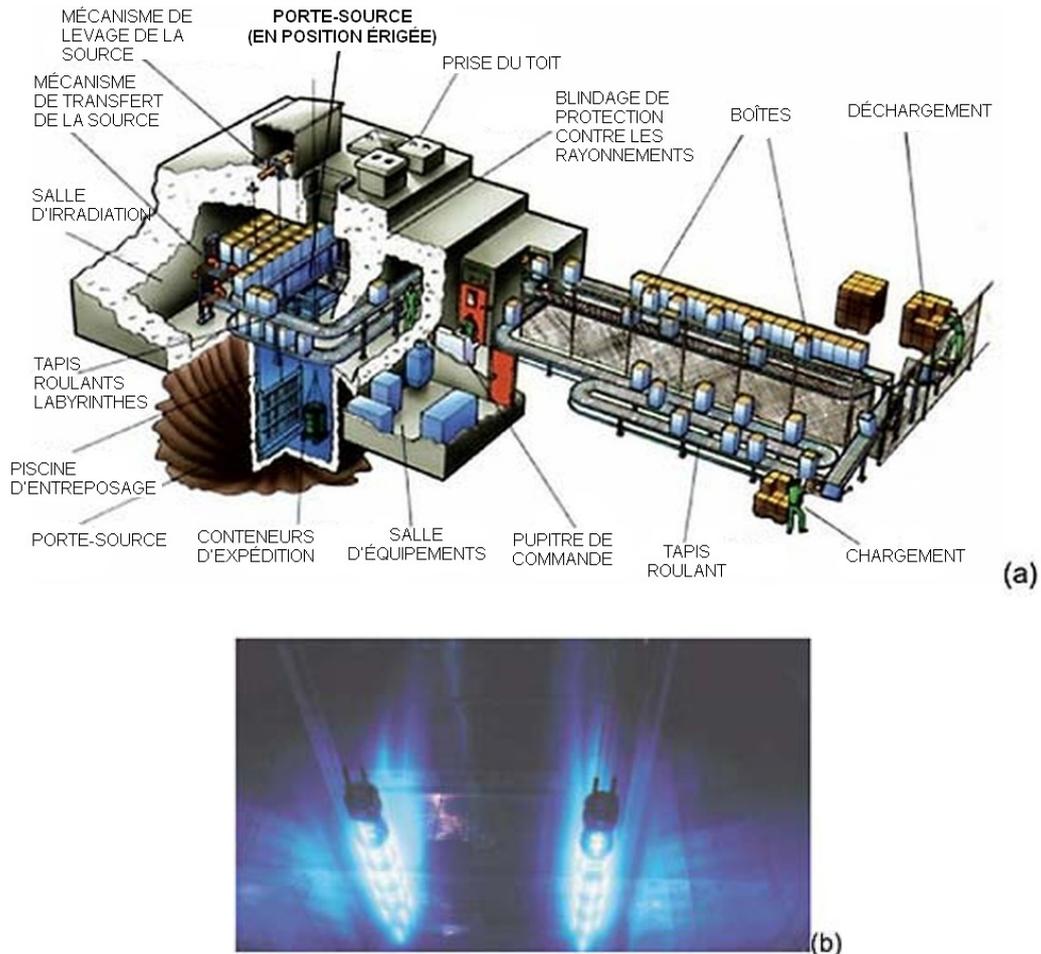


FIG. 8. a) Représentation artistique d'un irradiateur panoramique MDS Nordion JS-10000 utilisant un porte-source de type panneau (pas nécessairement à l'échelle) ; et b) différents porte-sources pour un irradiateur à palette MDS Nordion.

Les sources encapsulées dans des tubes en acier inoxydable sont appelées « crayons » ou « tiges ». La figure 9 présente le schéma d'un « crayon » gamma au ^{60}Co et la figure 10 une source industrielle de haute activité de type tige.

Ces sources sont fabriquées selon les normes ISO et d'autres normes [21, 27] et étiquetées en surface avec un code gravé pour identification. Ce code figure également sur le certificat de la source.

Si les crayons-sources sont produits par recyclage, leur forme et leurs dimensions peuvent être différentes de celles des originaux. L'activité nominale initiale d'un crayon-source varie de 18,5 TBq (500 Ci) à 450 TBq (12 000 Ci) et sa durée de vie recommandée est habituellement de 15 à 20 ans.

Si les installations d'irradiation ne sont pas bien entretenues, des objets peuvent entraver les mouvements du porte-source et déformer les cadres des modules, ce qui peut amener des crayons-sources à s'échapper et à tomber, comme cela s'est produit un certain nombre de fois. Ces sources peuvent éventuellement tomber dans l'une des « boîtes » dans lesquelles les produits irradiés sont transportés hors de l'installation. Des systèmes de surveillance sont installés aux points de sortie des produits dans les irradiateurs modernes pour détecter ce genre de situation.

Un autre aspect à prendre en compte est qu'un certain nombre de crayons-sources doivent être remplacés de temps en temps en raison de leur désintégration radioactive. En général, les fournisseurs des sources se chargent de cette tâche et les anciennes sources sont placées dans des conteneurs de transport spécialement conçus pour leur expédition. À ce stade, des problèmes de transport peuvent occasionner des retards, qui obligent à entreposer le conteneur, lequel peut être parfois oublié.

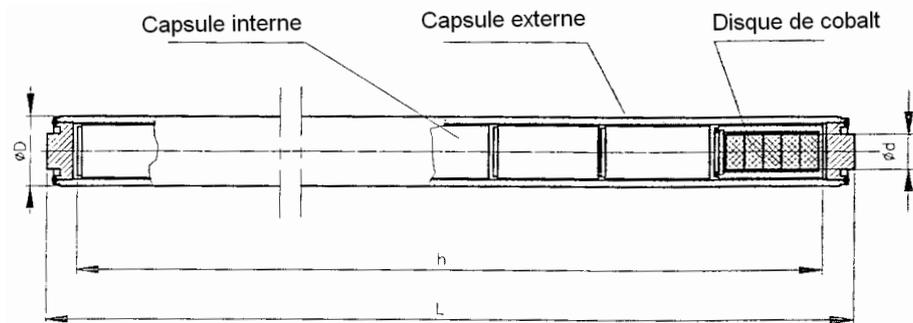


FIG. 9. Crayon-source au ^{60}Co .

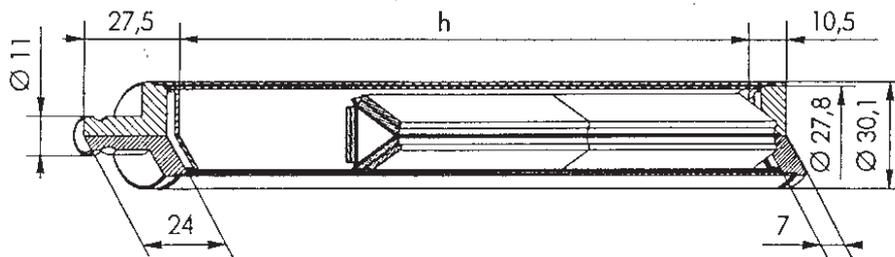


FIG. 10. Source industrielle de haute activité de type tige.

4.1.2.1. Irradiateurs autoblinvés

Il existe un certain nombre d'irradiateurs de plus petite taille qui ont été invariablement drcrits comme des irradiateurs autoblinvés (ou autonomes) ou des irradiateurs de produits sanguins/de tissus. Meme s'ils sont plus petits, ils contiennent toujours des sources de haute activit. La figure 11 montre un exemple de ce genre d'irradiateur et la figure 12 un irradiateur de produit sanguin de type plus ancien. Ces dispositifs sont utilisrs pour le traitement du sang et consistent en une chambre blindde avec une cavit dans laquelle est plac un chantillon de sang dans un sachet d'une capacit d'environ deux litres. Les hpitaux et les banques de sang irradient les produits sanguins pour prvenir la maladie du greffon contre l'hte associe la transfusion, une complication mortelle qui survient lorsque les globules blancs de certains donneurs attaquent les tissus du receveur.



FIG. 11. Irradiateur autoblinde courant.



FIG. 12. Irradiateur sanguin d'un modèle plus ancien.

Ces irradiateurs servent non seulement à stériliser des produits sanguins, des tissus et des graines, mais également à colorer des pierres précieuses, à stériliser des équipements médicaux, et à irradier des insectes, ainsi qu'à mener des travaux de recherche sur les conséquences des mutations sur les produits agricoles. En général, ce type d'irradiateur comporte une chambre pour les échantillons biologiques avec des portes à système de verrouillage et les sources sont déplacées dans la chambre ou celle-ci est rapprochée d'elles. Il n'y a aucun moyen simple d'accéder aux sources, mais avec quelques modifications, l'irradiateur peut également servir de conteneur pour le transport des sources.

Certains dispositifs, notamment certains types de détecteurs de rayonnements et de dosimètres, nécessitent un étalonnage d'irradiation à la fois rigoureux et précis à des doses élevées. Certaines sources d'étalonnage utilisées à ces fins sont également considérées comme des irradiateurs autoblindeés. Les sources de radionucléides sont généralement utilisées à cette fin parce que l'énergie (et le taux) de désintégration) est connue ou facile à calculer. Ces irradiateurs d'étalonnage sont, en moyenne, des sources de plus faible activité que les autres irradiateurs autoblindeés, mais l'activité de certains d'entre eux est d'environ 80 TBq (2 200 Ci) de ^{137}Cs .

Il y a des fabricants d'irradiateurs autoblindeés en activité, tels que : MDS Nordion du Canada ; CIS-US, Inc., une société française qui ne fabrique plus de nouveaux dispositifs mais entretient toujours ceux qui existent ; et une société américaine du nom de J.L. Shepherd and Associates. Rien qu'aux États-Unis d'Amérique, il y a 1 341 irradiateurs autoblindeés utilisant des sources radioactives, dont environ 85 % contiennent du ^{137}Cs , tandis que presque tous les autres utilisent du ^{60}Co . Ils comprennent notamment des irradiateurs sanguins, des irradiateurs de recherche et des irradiateurs d'étalonnage.

Peu de dispositifs fixes ont été impliqués dans des incidents en raison de leur conception et de leur robustesse.

Alors que la plupart de ces irradiateurs sont des dispositifs fixes, certains, tels que les irradiateurs « Gamma Kolos », étaient assemblés dans des camions lourds ou des remorques, puis déplacés partout dans l'ex-Union soviétique pour irradier des graines au moment des semailles. La plupart de ces dispositifs ont désormais été retirés de leurs véhicules et sont actuellement entreposés (fig. 13).



FIG. 13. Irradiateur portatif au césium utilisé en ex-URSS.

4.1.3. Dispositifs de téléthérapie

Les dispositifs de téléthérapie sont habituellement utilisés dans les établissements médicaux, comme les hôpitaux ou les cliniques. La radiothérapie utilise des rayonnements ionisants dirigés sur un corps humain ou animal pour traiter de nombreuses maladies graves, notamment le cancer. Des sources de radionucléides de haute activité peuvent servir à créer des faisceaux de rayonnements ionisants cliniques sous forme de rayons gamma à haute énergie dans des dispositifs de téléthérapie employés en radiothérapie externe. Seuls quatre radionucléides connus possèdent les caractéristiques nécessaires pour être utilisés en radiothérapie externe, à savoir : le ^{137}Cs , le ^{60}Co , l' ^{152}Eu et le ^{226}Ra . L'euporium 152 n'a pas encore été élaboré pour une utilisation clinique et l'utilisation du ^{137}Cs et du ^{226}Ra a été interrompue pour des raisons pratiques et des problèmes de sûreté. Le cobalt 60 est actuellement utilisé dans les dispositifs de radiothérapie externe que l'on trouve principalement dans les pays en développement.

La source radioactive, qui est relativement petite, est logée en sécurité dans le boîtier blindé massif à l'extrémité du bras rotatif (fig. 14). Le faisceau de rayonnement de la source est exposé par ouverture d'un obturateur pendant l'utilisation. Étant donné que le ^{137}Cs a été remplacé par le ^{60}Co , il faut désormais renouveler les sources à intervalles réguliers, généralement tous les cinq à sept ans, en raison de la période relativement courte du ^{60}Co . L'équipement de téléthérapie a donc été conçu pour permettre de retirer la source de la tête et de la mettre dans des conteneurs de transport blindés in situ.

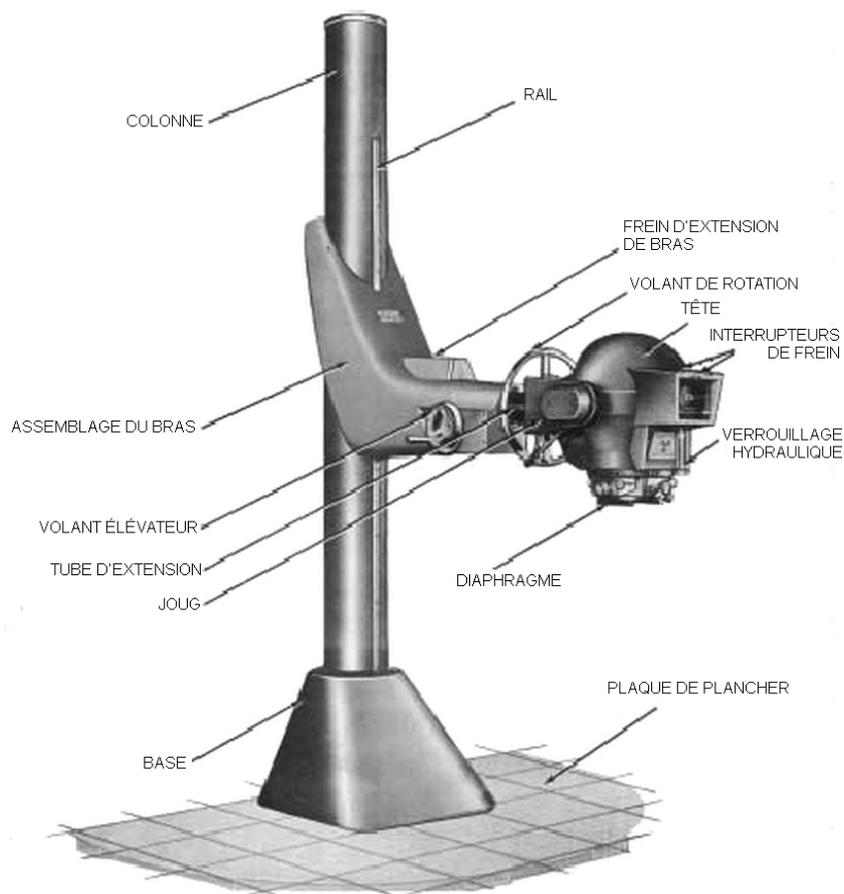


FIG. 14. Ancien dispositif de téléthérapie au césium (vers 1960).

Pour faciliter l'échange de sources entre dispositifs de téléthérapie et entre installations de production de radionucléides, des capsules de source types ont été mises au point pour utilisation partout dans le monde. Les sources de téléthérapie sont généralement remplacées dans la période radioactive suivant l'installation, mais des considérations financières peuvent obliger à les utiliser plus longtemps. Les dispositifs de téléthérapie sont conçus pour permettre le remplacement des sources sur site par des techniciens qualifiés (les dispositifs ne sont pas renvoyés au fabricant pour remplacer les sources).

La figure 15 montre des photos d'anciennes têtes endommagées retirées des dispositifs de téléthérapie.



FIG. 15. Anciennes têtes de téléthérapie et têtes de téléthérapie endommagées.

Les sources au cobalt 60 se présentent généralement sous forme solide, métallique, car elles sont composées de pastilles ou de disques. Elles sont logées dans une double capsule en acier inoxydable. Les sources sont fabriquées en deux ou trois tailles standard et peuvent être montées dans des entretoises en tungstène à l'intérieur de la tête de téléthérapie. Des sources au ^{60}Co utilisées dans divers dispositifs de téléthérapie sont présentées à la figure 16.



FIG. 16. Sources de téléthérapie au ^{60}Co avec accessoires associés pour le chargement dans la tête de téléthérapie.

Les sources de téléthérapie au césium 137 sont généralement sous forme de chlorure de césium afin de produire l'activité spécifique élevée nécessaire pour permettre de concevoir de petites sources à des fins de traitement. Lorsqu'une source de chlorure de césium n'est plus confinée, la contamination se propage très rapidement en raison de la grande mobilité de la matière. Ainsi, le problème est plus sérieux avec des sources contenant des formes chimiques qui peuvent être facilement dispersées.

4.1.4. Dispositifs fixes de téléthérapie multifaisceaux (Gamma Knife®)

Le dispositif de téléthérapie multifaisceaux utilise un grand nombre de sources en réseau et concentre ses faisceaux sur des zones de traitement bien définies. Il est utilisé pour des procédures médicales (radiochirurgie) dans les cas de tumeurs du cerveau et d'autres maladies cérébrales.

Le Gamma Knife® [Elekta, Stockholm (Suède)] est un dispositif de radiochirurgie associé à cette discipline depuis les 40 dernières années. Malgré les grandes avancées technologiques enregistrées pendant cette période, la conception et les principes fondamentaux du Gamma Knife® n'ont pas beaucoup changé depuis que le neurochirurgien suédois Lars Leksell a introduit le prototype en 1968. Le dispositif compte 201 sources au ^{60}Co logées dans sa partie centrale. Ces sources produisent 201 faisceaux collimatés dirigés sur un seul point focal (isocentre du dispositif) à une distance source-foyer d'environ 40 cm. La définition finale de la taille du champ du faisceau circulaire est fournie par l'un des quatre casques produisant des champs circulaires de diamètres nominaux compris entre 4 et 18 mm au point focal du dispositif.

Il y a environ 200 dispositifs Gamma Knife® dans le monde, dont au moins 104 aux États-Unis. Elekta, une société suisse/suédoise, est le seul fabricant de Gamma Knife®, tandis que MDS Nordion est le principal fabricant des petites sources scellées au cobalt 60. Une société chinoise, GammaStar, a commencé à commercialiser un dispositif concurrent et Elekta vend actuellement une nouvelle version du Gamma Knife® contenant 192 sources, au lieu des 201 utilisées dans les modèles précédents.

Les installations équipées de dispositifs de radiothérapie sont spécialement conçues pour cet usage et ont des murs épais, blindés, ainsi que d'autres équipements de protection. La figure 17 présente un modèle courant de dispositif de téléthérapie multifaisceaux.

Chacune des sources au ^{60}Co du Gamma Knife® se présente sous la forme d'une capsule en acier d'un millimètre de diamètre et de 20 mm de hauteur, contenant 20 pastilles de ^{60}Co . Cette capsule est logée dans une autre capsule en acier, qui est enfermée par une douille et chargée dans la partie centrale de la machine. Chaque assemblage de traversées de la source est aligné avec son précollimateur (6,5 cm d'alliage de tungstène), un collimateur fixe (9,25 cm de plomb) et le collimateur final (6 cm d'alliage de tungstène) sur l'un des quatre casques.



FIG. 17. Installation de Gamma Knife® montrant la partie principale de l'appareil renfermant 201 sources au cobalt (à 30 Ci = 1,11 TBq pour chaque source), la table de traitement sur laquelle est fixé un casque de collimateur.

4.2. DISPOSITIFS ET SOURCES DE CATÉGORIE 2

4.2.1. Projecteurs de gammagraphie industrielle

La gammagraphie est l'une des technologies utilisées dans l'industrie à des fins d'évaluation de la sûreté et de contrôle de la qualité. En particulier, elle est largement employée dans les industries chimique, pétrochimique et du bâtiment pour l'inspection radiographique des tuyaux, des chaudières et des structures où les défaillances peuvent avoir de graves conséquences économiques et en matière de sûreté.

Les projecteurs de gammagraphie industrielle servent à radiographier les structures techniques. Ils renferment une source unique attachée à un câble flexible qui peut être exposée à proximité de l'objet étudié. Une pellicule radiographique fixée derrière celui-ci est impressionnée par les rayons gamma pénétrants. Les variations de densité de l'élément radiographié apparaissent sur l'image de la pellicule. Ces dispositifs sont aussi souvent appelés caméras de radiographie (fig. 18).

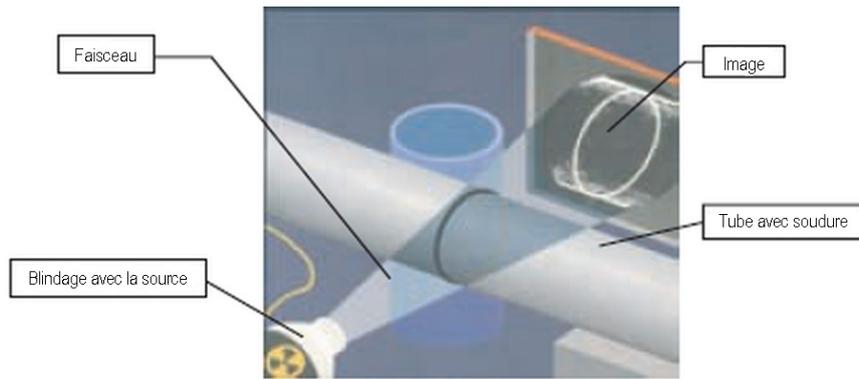


FIG. 18. Système courant de gammagraphie.

La plupart des équipements de radiographie industrielle comportent une unité de radiographie qui peut contenir de l'uranium appauvri comme matériau de protection, et une ou plusieurs sources scellées (fig. 19). Les sources de gammagraphie utilisées actuellement dans le monde contiennent de l' ^{192}Ir , du ^{60}Co , de l' ^{169}Yb , du ^{170}Tm ou du ^{75}Se . Elles sont généralement logées dans une double capsule en acier inoxydable, et contiennent une ou plusieurs pastilles de matière active sous forme métallique. La source est maintenue dans un assemblage souple, parfois appelé porte-source, crayon, furet ou queue-de-cochon (voir les figures 20 à 22). Les dispositifs de radiographie industriels portables sont généralement de petite taille, bien qu'ils soient relativement lourds en raison du blindage.



FIG. 19. Projecteurs de radiographie industrielle courants.



FIG. 20. Anciens assemblages de source/queue-de-cochon courants de gammagraphie.

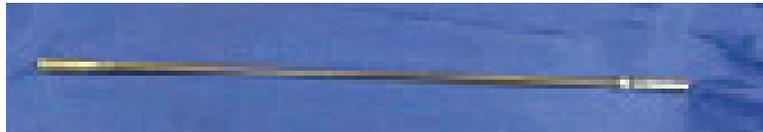


FIG. 21. Assemblage moderne de source/queue-de-cochon courant de gammagraphie.



FIG. 22. Capsule interne courante de source de gammagraphie avant encapsulation dans la queue-de-cochon.

Lorsqu'elle n'est pas utilisée, la source est au centre du conteneur. Pendant l'utilisation, elle est poussée vers le bas dans la position souhaitée grâce à un dispositif télécommandé. Dans les industries lourdes, telles que les fonderies d'acier ou les aciéries, un système de radiographie portable, mobile (sur roues) ou fixe contenant de l' ^{192}Ir , du ^{60}Co ou du ^{137}Cs peut être installé dans des enceintes spécialement conçues. Étant donné que les installations mobiles ou fixes ont un blindage plus lourd que les boîtiers de sources portables, elles sont moins sujettes au vol et plus difficiles à démonter.

Les boîtiers des sources portables contiennent plusieurs dizaines de kilogrammes de matériel de blindage, tel que de l'uranium appauvri, du plomb ou du tungstène, qui peut être considéré comme ayant une valeur marchande potentielle. Un autre aspect important est que la plupart des équipements sont portables et peuvent donc être utilisés presque partout, y compris souvent dans des endroits éloignés ou des conditions de travail extrêmes. Cela, ajouté à une surveillance limitée ou à l'absence totale de surveillance, signifie que des conteneurs entiers avec leurs sources peuvent être perdus ou volés. Ils peuvent terminer dans l'industrie de recyclage des métaux ou rester dans le domaine public. Ces problèmes sont similaires à ceux des sources de radiothérapie retirées du service, et même si les niveaux d'activité en radiographie industrielle sont faibles, ils sont quand même suffisants pour avoir des conséquences létales. C'est sans doute la perte d'une source non blindée qui représente la menace la plus importante. Leur nombre élevé, l'environnement de travail, le niveau d'activité et la portabilité/mobilité de la plupart des sources de radiographie industrielle en font des cibles privilégiées pour des acquisitions délibérées à des fins malveillantes.

4.2.2. Dispositifs de curiethérapie à débit de dose élevé/moyen

Le terme curiethérapie (thérapie à courte distance) est utilisé pour décrire l'application interstitielle ou intracavitaire de sources radioactives placées soit directement dans une tumeur (sein, prostate), soit dans des moules (peau, rectum) ou dans des applicateurs spéciaux (vagin, col de l'utérus). Les applications de curiethérapie sont de deux types légèrement différents généralement appelés curiethérapie à haut débit de dose (HDR en anglais) (catégorie 2) et curiethérapie à faible débit de dose (LDR en anglais) (catégorie 4 ou 5). Les sources HDR, et quelques sources LDR, peuvent se présenter sous la forme d'un long fil relié à un dispositif (de téléchargement différé).

Celui-ci peut être lourd, en raison du blindage nécessaire pour les sources lorsqu'elles ne sont pas utilisées. Il peut être sur roues pour être transporté à l'intérieur d'une installation. Ce dispositif peut également contenir des composants électriques et électroniques nécessaires à son fonctionnement (fig. 23). Lors de son utilisation, un cathéter est d'abord introduit dans l'organisme, puis la source reliée à un câble est introduite à distance.

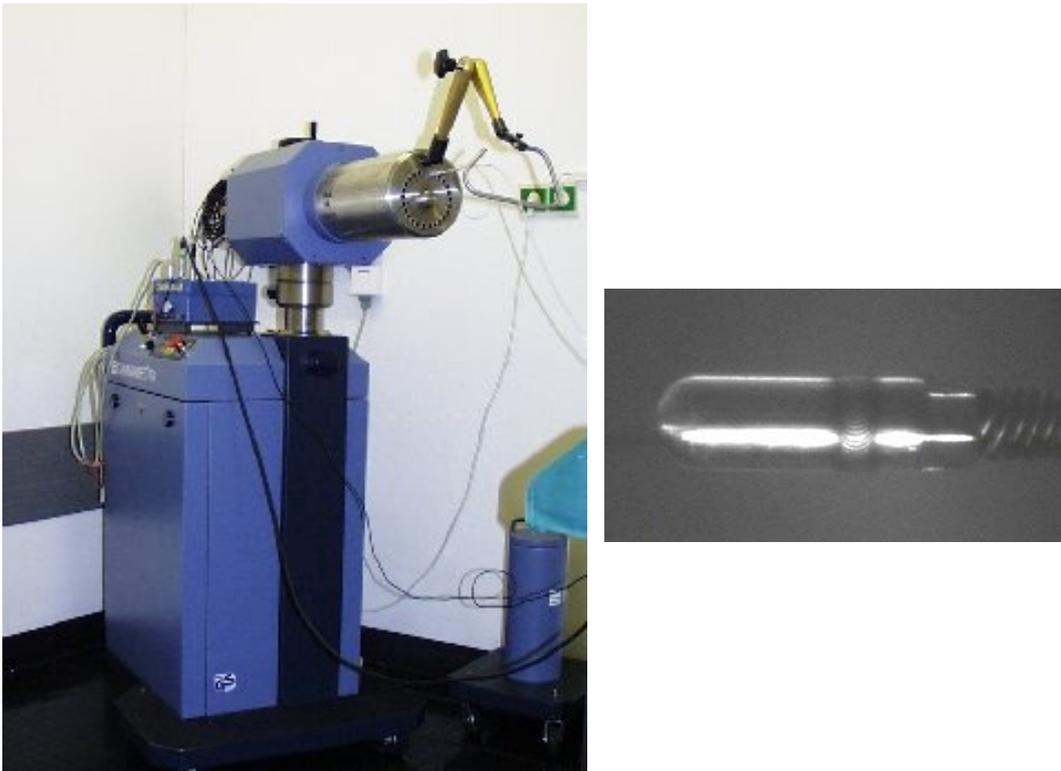


FIG. 23. Dispositif de curiethérapie LDR avec des sources à l' ^{192}Ir , et source à l' ^{192}Ir .

Autrefois, on utilisait le ^{226}Ra en curiethérapie. La source était enveloppée dans du platine, soit dans des aiguilles, soit dans des tubes de quelques millimètres de diamètre dont la longueur pouvait atteindre 5 cm. Aujourd'hui, la curiethérapie à débit de dose élevé et moyen est pratiquée avec l' ^{192}Ir , mais le ^{60}Co et le ^{137}Cs sont également utilisés. Les sources sont fabriquées dans des tailles et des formes différentes, y compris sous forme de fils ou de rubans.

Lorsqu'elles ne sont pas utilisées, les sources de curiethérapie sont généralement conservées dans des coffres-forts ou des conteneurs blindés en plomb, mais il est arrivé qu'elles soient restées chargées dans les applicateurs dans des chariots de transport, contrairement à la règle. De même, des sources ayant dépassé leur durée de vie utile ont été abandonnées dans des coffres-forts ou des conteneurs de transport.

En cas de rupture du câble d'un système de téléchargement différé, la source peut se détacher. Le fait de ne pas reconnaître ces problèmes peut présenter des risques importants.

4.2.3. Systèmes d'étalonnage

Les systèmes d'étalonnage utilisent des sources radioactives de haute activité [environ 15 à 82 TBq (400 à 2 200 Ci)] pour produire des champs de rayonnement d'intensité connue pour l'étalonnage des équipements de contrôle radiologique et des dosimètres, étalonnage qui permet d'évaluer ces équipements et ces dosimètres en vue d'un fonctionnement précis. Il faut une source d'activité mesurée pour étalonner les instruments et les dosimètres selon les normes acceptées. La figure 24 présente un diagramme et la photographie d'une source courante d'étalonnage de faisceau gamma.

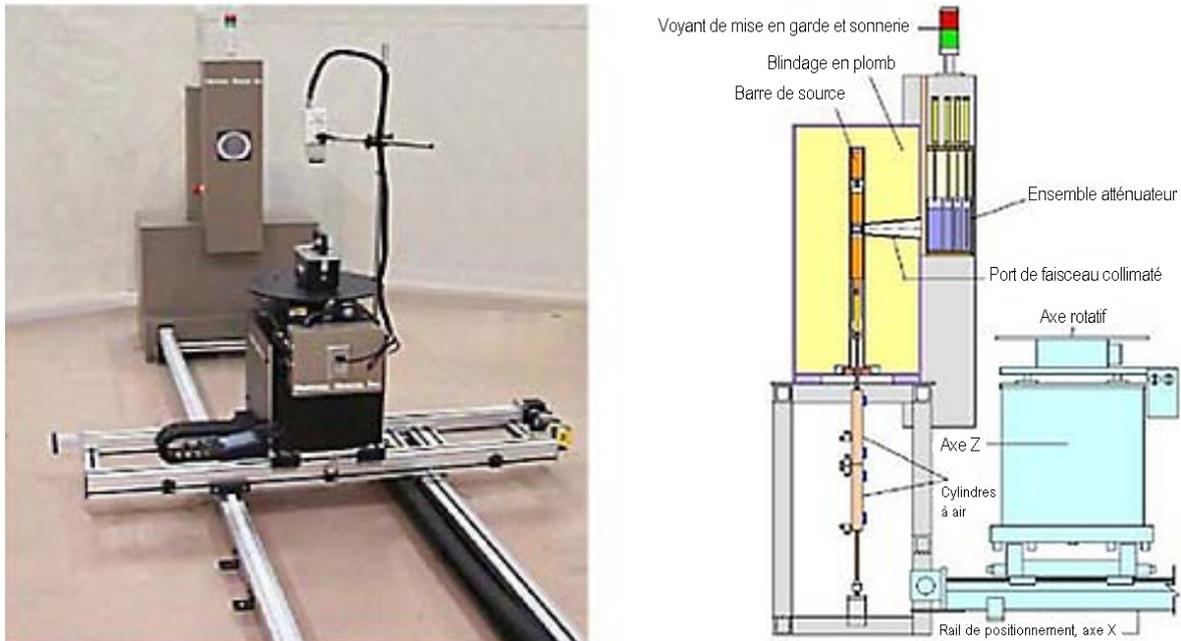


FIG. 24. Configuration courante d'un dispositif d'étalonnage gamma des instruments de mesure.

Le système se compose généralement de sources radioactives, d'un blindage contre les rayonnements, d'un mécanisme de positionnement de la source et d'une piste ou d'une chambre interne pour positionner les articles à étalonner. Les systèmes d'étalonnage modernes peuvent comporter un dispositif de contrôle informatisé et des systèmes de sûreté, tels que la surveillance vidéo, des moniteurs de rayonnement, des voyants et indicateurs de mise en garde, ainsi qu'un système de verrouillage de sûreté.

De nombreuses sources radioactives sont utilisées pour l'étalonnage d'instruments et d'autres types d'étalonnage. Étant donné le large éventail de radionucléides et d'activités, il est impossible d'affecter ces sources à une seule catégorie. Toutefois, les sources d'étalonnage de grande taille au ^{60}Co et au ^{137}Cs sont généralement de catégorie 2. Certaines sources peuvent appartenir aux catégories 3 et 4, mais la plupart d'entre elles appartiennent à la catégorie 5.

Certaines sources d'étalonnage, en particulier celles de très haute activité, sont logées dans des dispositifs spéciaux, blindés et collimatés dans de grandes installations blindées. D'autres sont juste des sources isolées qu'on peut utiliser à des fins très variées, dans l'industrie nucléaire, dans le domaine de la protection de l'environnement et dans des établissements de recherche et d'enseignement. Un large éventail de radionucléides, ou une combinaison de radionucléides, sont utilisés dans les sources d'étalonnage et celles-ci sont de modèles et de formes variés (fig. 25).



FIG. 25. Exemples de sources d'étalonnage de faible activité au ^{60}Co , au ^{137}Cs , au ^{90}Sr et au ^{226}Ra .

4.3. DISPOSITIFS ET SOURCES DE CATÉGORIE 3

4.3.1. Jauges industrielles fixes

Les jauges radioactives fixes sont utilisées pour mesurer le niveau, l'épaisseur, la densité, la teneur en humidité ou la présence d'un matériau donné pendant son extraction, sa fabrication ou son traitement, sans entrer en contact avec le matériau lui-même (fig. 26). En fonction de l'application particulière, elles peuvent contenir des quantités relativement faibles de matière radioactive, ou bien des sources dont l'activité se rapproche de 1 TBq. Les sources au ^{137}Cs , au ^{60}Co et au ^{252}Cf d'activité relativement élevée (autour de 100 GBq), utilisées comme jauges de niveau, de convoyeur, de drague, de haut fourneau ou comme jauges d'épaisseur rotatives, sont des sources de catégorie 3, alors que la plupart des autres jauges d'épaisseur, d'humidité/de densité et de niveau de remplissage sont de catégorie 4.

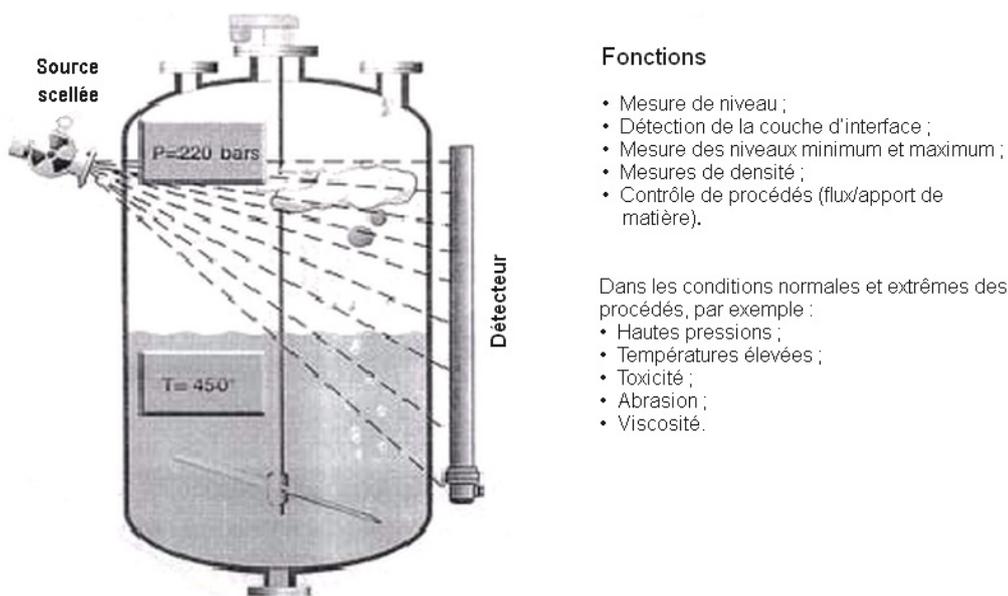


FIG. 26. Diverses fonctions des sources scellées dans le contrôle de procédés.

Les hauts fourneaux servant à la production d'acier utilisent souvent des sources au ^{60}Co pour jauger l'usure du revêtement réfractaire de la sole. Les jauges d'épaisseur rotatives utilisent du ^{137}Cs pour mesurer l'épaisseur des parois des tuyaux à mesure qu'elles sont passées au centre de la jauge. Bien

que les jauges des tuyaux soient classées dans la catégorie des jauges fixes, elles peuvent également être chargées sur des camions. Toutefois, elles peuvent être relativement lourdes (environ 100 kg) en raison de leur blindage en plomb ou en tungstène (fig. 27).



FIG. 27. Exemples de différents types de jauges.

Ces dispositifs sont rarement de grande taille, mais peuvent être relativement éloignés du détecteur de rayonnements, qui peut renfermer des composants électriques ou électroniques associés. Il peut être difficile de repérer ces dispositifs ou ces sources dans une installation, car ils sont souvent connectés à des dispositifs de mesure des procédés. Si on n'arrive pas à les repérer, on peut en perdre le contrôle si l'installation décide de rénover une usine ou de mettre fin à ses activités et la source retirée du service peut alors se retrouver dans l'industrie du recyclage des métaux. Si la voie de recyclage des métaux n'est pas surveillée ou si le système ne fonctionne pas, la source peut être fondue, entraînant la contamination de la fonderie et l'incorporation de matières radioactives dans les produits manufacturés.

4.3.2. Sondes de diagraphie

La diagraphie est la mesure des propriétés des strates géologiques à travers lesquelles un puits a été ou est foré. Le journal de sonde est le tracé ou l'enregistrement des données d'un capteur de fond de puits en fonction de la profondeur de celui-ci. Son application la plus courante est celle des industries pétrolière et gazière qui recherchent des zones d'hydrocarbures récupérables. À cet effet, les sociétés ont besoin de plusieurs types d'informations sur une couche géologique, comme la teneur en hydrocarbures. Pour recueillir ces informations, elles peuvent faire descendre des sources et des capteurs chargés dans des boîtiers appelés sondes dans un trou de forage existant (une technique appelée diagraphie par câble) ou les monter sur un collier derrière la tête de forage pour prendre des mesures pendant le forage du puits.

Une combinaison de sources de neutrons et de sources gamma permet de déterminer la densité, la porosité et l'humidité ou le contenu en hydrocarbures des structures géologiques. Les sources de neutrons les plus couramment utilisées sont l' $^{241}\text{Am-Be}$ dont l'activité va jusqu'à 800 GBq, mais des sources de $^{239}\text{Pu-Be}$ et de $^{226}\text{Ra-Be}$ ont également été employées. Les sources gamma les plus utilisées sont les sources au ^{137}Cs dont l'activité va 50 à 100 GBq. De petites sources, souvent de radium, continuent d'être utilisées, à des fins de référence. Ces sources sont généralement placées dans des dispositifs relativement

longs (généralement de 1 à 2 m), mais minces (diamètre < 10 cm), qui renferment aussi des détecteurs et différents composants électroniques. Ces dispositifs sont lourds, en raison de la robustesse nécessaire dans les environnements où ils sont utilisés. La figure 28 est une illustration schématique d'une source de neutrons et d'un dispositif de diagraphie. Un exemple de dispositif de diagraphie et certaines sources courantes de neutrons $^{241}\text{Am-Be}$ utilisées en diagraphie pétrolière sont présentés dans les figures 29 et 30.

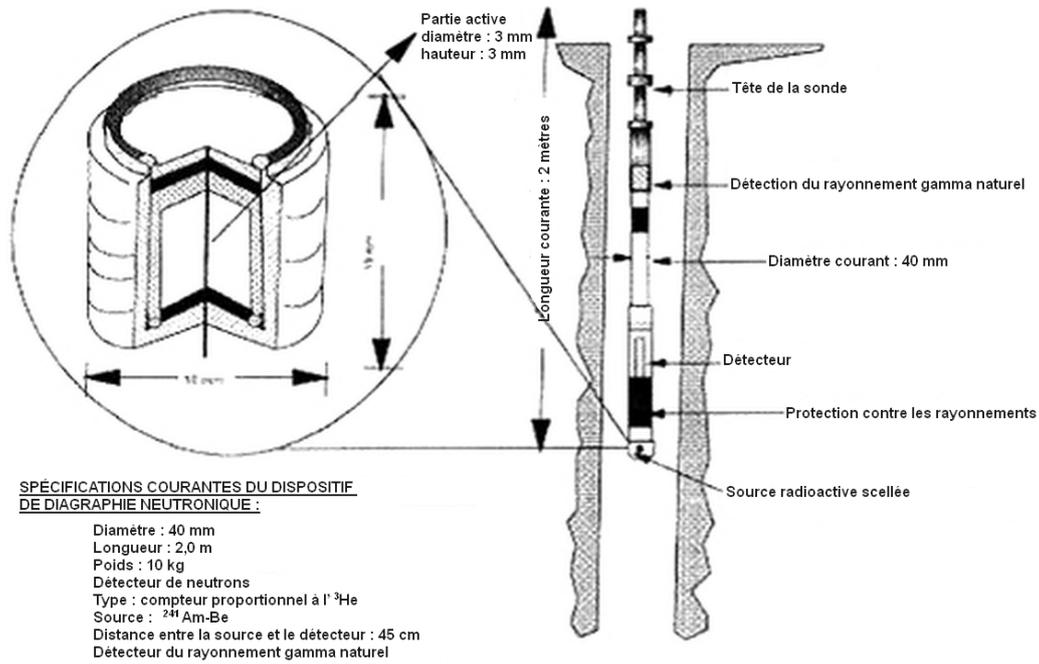


FIG. 28. Représentation schématique d'une source de neutrons et d'un équipement de diagraphie.



FIG. 29. Tête d'une source de chenille de canalisation dans un conteneur d'expédition.

La figure 31 est une photographie d'un instrument de diagraphie gamma-gamma, montrant le dispositif de manutention utilisé pour insérer et retirer la source au ^{137}Cs .



FIG. 30. Sources courantes de neutrons d' $^{241}\text{Am-Be}$ utilisées en diagraphe pétrolière.



FIG. 31. Atlas Densilog utilisant une source vitrifiée au ^{137}Cs pour mesurer la densité de câbles. La tige dirigée vers le bas sert à manipuler la source. Les cercles de couleur claire sont des fenêtres prévues pour la source et les détecteurs.

Les boîtiers dans lesquels sont logées et transportées les sources de neutrons sont de grande taille et peuvent attirer les voleurs. Le gros du blindage est généralement en plastique ou en cire de paraffine et un voleur peut le considérer comme inutile et le jeter, ce qui peut conduire à une situation de risque. Les boîtiers des sources gamma sont généralement blindés avec de l'uranium appauvri ou du plomb, ce qui peut être attractif en raison de leur valeur à la casse. La nature du travail utilisant ces sources requiert qu'elles puissent être facilement retirées de leur boîtier afin d'être introduites dans un forage. Sans contrôle adéquat, il serait relativement facile de les retirer et de les laisser dans des conditions à risque.

4.3.3. Stimulateurs cardiaques

Au cours des années 1970 et 1980, des stimulateurs cardiaques (figure 6) utilisant des matières radioactives comme source d'énergie (par exemple de très petits GTR) ont été implantés chez certains patients. Le radionucléide le plus souvent utilisé était le ^{238}Pu (avec une petite quantité d' ^{241}Am comme

contaminant de la source). Un avantage de l'utilisation du ^{238}Pu est qu'il était relativement facile à protéger, ce qui signifie que la dose externe était minimale.

Il est également possible que les gens se débarrassent des sources suite à une autopsie et qu'elle finisse dans les métaux recyclés. Le fait que les sources au ^{238}Pu soient faciles à blinder signifie aussi qu'elles ne sont pas faciles à trouver.

4.4. DISPOSITIFS ET SOURCES DE CATÉGORIE 4

4.4.1. Sources de curiethérapie à faible débit de dose

La plus grande partie de ce qui a été dit sur les sources de curiethérapie de catégorie 2 est également valable ici, mis à part le fait que l'activité est plus faible et que d'autres radionucléides sont utilisés, comme l' ^{125}I et l' ^{198}Au .

4.4.2. Jauges d'épaisseur/de niveau de remplissage

Les sources bêta (fig. 32) ou les sources gamma de faible énergie servent à mesurer l'épaisseur du papier, du plastique et des métaux minces et légers, alors que les sources gamma de haute énergie sont utilisées dans la fabrication des plaques d'acier (voir l'exemple de la figure 33). Certaines industries telles que les brasseries ou les usines de mise en bouteille de sodas utilisent les sources de faible activité au niveau du contrôle de la qualité pour s'assurer que les bouteilles ou les cannettes en métal sont remplies correctement. Les fabricants de cigarettes aussi utilisent des sources pour vérifier que la densité d'emballage est appropriée.



FIG. 32. Porte-source de jauge bêta.

Les radionucléides généralement utilisés dans ces industries sont notamment le ^{85}Kr , le ^{90}Sr , l' ^{241}Am , le ^{147}Pm , le ^{244}Cm , et le ^{137}Cs . Leur activité varie de 0,4 GBq à environ 20 GBq. La source radioactive est choisie en fonction de l'épaisseur du matériau à mesurer, afin d'optimiser les caractéristiques d'atténuation du rayonnement. Le strontium 90 est utilisé pour des matériaux plus épais et plus denses, et pour les matériaux les plus minces et moins denses, on peut aller jusqu'à utiliser du ^{147}Pm . La figure 34 présente des exemples de sources au Cs retirées de jauges.



FIG. 33. Jauge bêta sur une unité de traitement en ligne.



FIG. 34. Exemples de sources au Cs retirées de jauges.

4.4.3. Jauges portables d'humidité/de densité

Ces dispositifs utilisent ensemble deux types de sources de rayonnement : une source gamma à haute énergie au ^{137}Cs d'environ 40 MBq (1 mCi) et une source de neutrons d' $^{241}\text{Am/Be}$ d'environ 2 GBq (55 mCi). Ils sont portables et normalement utilisés pour mesurer la densité et la teneur en humidité du

sol et des matériaux de construction. La densité est déterminée en mesurant la quantité de rayonnement rétrodiffusé de la source gamma, et la teneur en humidité est dérivée de la mesure gamma et d'une mesure de la quantité de rayonnement neutronique rétrodiffusée.

Les sources sont de petite taille, généralement de quelques millimètres de long sur quelques centimètres de diamètre et peuvent être soit complètement logées à l'intérieur du dispositif, soit fixées au bout d'un ensemble tige/poignée. Le dispositif porte-source se compose généralement d'un boîtier en acier lourd, au centre duquel est chargée la source, et d'une protection neutronique, qui peut être du polyéthylène ou un autre type de matériau à haute teneur en hydrogène. Il est du type simple obturateur, qui s'ouvre pour révéler une ouverture à travers laquelle se transmet le faisceau de rayonnement. Le détecteur de neutrons est généralement logé dans le même dispositif que la source.

Les jauges d'humidité sont utilisées en agriculture pour optimiser l'arrosage (fig. 35), alors que les jauges de profondeur ou de densité sont souvent utilisées dans la construction de routes pour le compactage approprié des matériaux de fondation (fig. 36).



FIG. 35. Dispositif de mesure de l'humidité de matériaux en vrac.

Les jauges portables sont utilisées sur des sites éloignés de construction de routes. Dans ces conditions et du fait de leur petite taille, il est facile d'en perdre le contrôle ou elles peuvent être facilement volées. Parfois, elles sont endommagées par d'autres équipements de construction de route et peuvent passer inaperçues.



FIG. 36. Jauge portable à l' $^{241}\text{Am}/\text{Be}^{137}\text{Cs}$.

4.4.4. Ostéodensitomètres

Comme leur nom l'indique, les ostéodensitomètres sont utilisés dans des dispositifs conçus pour mesurer la densité osseuse dans le cadre de l'évaluation de l'ostéoporose. Les radionucléides utilisés dans ces sources sont principalement le ^{109}Cd , le ^{153}Gd , l' ^{125}I et l' ^{241}Am , avec des activités allant d'environ 1 à 50 GBq.

4.4.5. Éliminateurs d'électricité statique

Dans de nombreuses industries, la production d'électricité statique crée des problèmes au cours des processus de fabrication, conduisant au dépôt de poussières sur des composants, ce qui peut provoquer des incendies. Pour réduire au minimum ces problèmes, on utilise des éliminateurs d'électricité statique incorporant des sources à l' ^{241}Am , au ^{210}Po et au ^{90}Sr .

On distingue deux grands types de dispositifs : les barres (fig. 37) et les pistolets (fig. 38). Les dispositifs à barres émettent un « nuage » de particules alpha à une distance d'environ 8 cm de la surface et celles-ci ionisent le gaz environnant (air) et permettent de conduire toute charge statique présente sur les matériaux environnants en toute sûreté vers le sol par décharge lente. Les pistolets sont utilisés sur les conduites d'air pneumatiques et l'air qui les traverse est ionisé. Le flux d'air résultant peut être utilisé pour souffler la poussière des objets et éliminer la charge statique présente sur leur surface et qui attire la poussière. Pour les barres, la feuille est placée dans un boîtier métallique avec une grille pour permettre la libre circulation de l'air ionisé, mais protéger la feuille ; et pour les pistolets, la feuille est placée dans un boîtier métallique tubulaire qui fait partie de la conduite d'air et de la poignée du pistolet.

La taille des dispositifs varie, de quelques centimètres pour les dispositifs portatifs à plusieurs mètres de long et quelques centimètres de large pour les dispositifs fixes (fig. 37). La configuration géométrique de certains de ces dispositifs est assez complexe en ce sens que la matière brute radioactive est répartie sur la surface de la structure. Étant donné que les éliminateurs d'électricité statique utilisent les particules alpha, l'assemblage de la source est fragile et ne peut résister aux mauvais traitements physiques ni au feu, qui peuvent tous entraîner une propagation de la contamination.

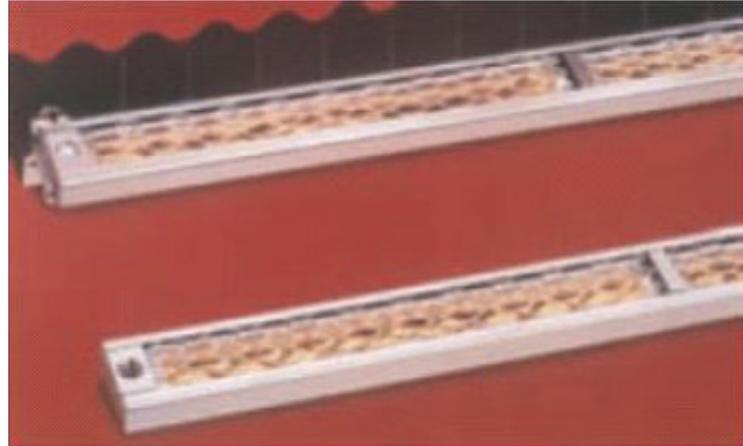


FIG. 37. Barres d'élimination de l'électricité statique.



FIG. 38. Pistolet à air courant pour l'élimination de l'électricité statique.

4.5. DISPOSITIFS ET SOURCES DE CATÉGORIE 5

Il existe un grand nombre et une grande variété de sources de catégorie 5 utilisées dans les domaines suivants : spectrométrie de fluorescence X, dispositifs de capture électronique, spectrométrie Mössbauer, tomoscintigraphie par émission de positons, cibles de tritium et détecteurs de fumée (figures 39 et 40). En outre, des sources au $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ sont utilisées pour le traitement superficiel des lésions cutanées et des lésions ophtalmiques.

Les applicateurs nasopharyngés (^{90}Sr) ont remplacé la sonde au radium de « Crowe » utilisée dans les années 1970. Des implants permanents ont également été mis au point à cette époque, avec des grains d' ^{198}Au . Aujourd'hui, les implants permanents utilisent l' ^{125}I , le $^{106}\text{Ru/Rh}$ et le ^{103}Pd .



FIG. 39. Détecteur de fumée démonté.

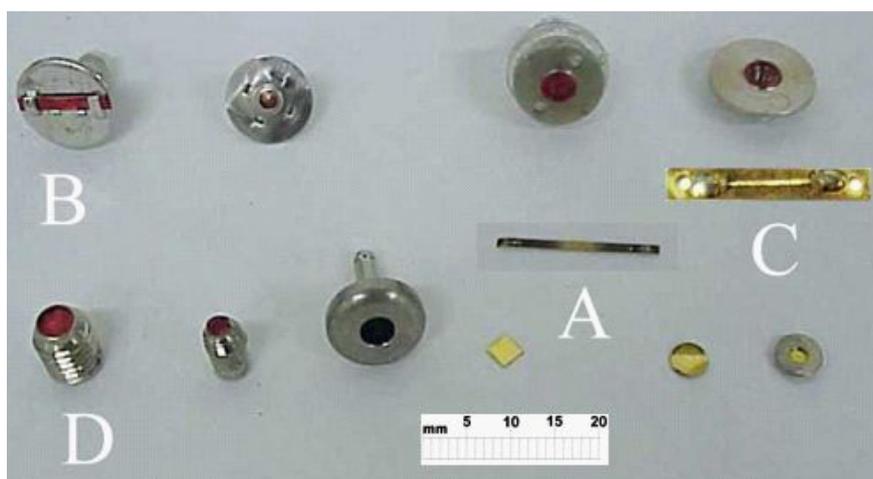


FIG. 40. Sources radioactives à ^{241}Am couramment utilisées dans les détecteurs de fumée.

Les sources de catégorie 5 présentent un risque tellement faible qu'elles n'ont généralement pas besoin d'être prises en compte dans la stratégie nationale. La perte de contrôle de ces sources est davantage un problème réglementaire et administratif qu'un problème de sûreté radiologique ou de sécurité des sources radioactives.

4.6. SITUATIONS PARTICULIÈRES

Du point de vue de la gestion, les sources héritées du passé qui ont été utilisées avant l'établissement des prescriptions réglementaires appropriées et sont toujours entreposées posent un problème particulier. Leur type dépend du moment où les contrôles réglementaires sont entrés en vigueur dans l'État Membre. Ce sont probablement en majorité mais pas exclusivement des sources au radium.

4.6.1. Paratonnerres

Des paratonnerres radioactifs (fig. 41) ont été installés dans de nombreux pays. Le radionucléide de la source, tel que le ^{60}Co , le ^{85}Kr , l' ^{152}Eu , le ^{226}Ra ou l' ^{241}Am , augmente l'efficacité du dispositif par ionisation de l'air environnant. Lorsque le ^{60}Co , le ^{85}Kr ou l' ^{152}Eu sont utilisés, le contenu radioactif est encapsulé et blindé pour diriger le faisceau de rayonnement vers le haut. Il n'y a pas de risque de contamination, mais le débit de dose en haut de la tige peut atteindre plusieurs milliers de mSv/h. Le radium 226 ou l' ^{241}Am ne sont pas encapsulés, mais déposés sur des feuilles ou mélangés à de la céramique. Le débit de dose est inférieur à 1 mSv/h, mais la contamination est omniprésente. C'est pour ces raisons et compte tenu de la faible efficacité du dispositif qu'on a cessé d'utiliser les paratonnerres radioactifs (conducteurs). Leur fabrication et leur vente sont interdites dans tous les pays de l'Union européenne depuis 1986.



FIG. 41. Paratonnerres à l' ^{241}Am .

4.6.2. Utilisations dans la recherche et le monde universitaire

Étant donné le large éventail d'applications de sources radioactives dans l'enseignement et la recherche, les sources utilisées sont brièvement examinées ici. Dans la mesure où presque tous les radionucléides, quel que soit leur niveau d'activité, peuvent être utilisés dans des travaux de recherche, les sources concernées peuvent appartenir à n'importe quelle catégorie.

Les irradiateurs de recherche sont utilisés pour exposer des matériaux biologiques et non biologiques à divers types de rayonnements afin d'évaluer la réponse des matériaux cibles à divers niveaux de doses, de débits de dose et d'énergie de la source de rayonnement appliquée. Ils sont utilisés de manière limitée dans la recherche sur les matériaux mais largement dans la recherche radiobiologique. Les irradiateurs servent également à évaluer les composants électroniques ainsi que ceux des satellites.

La recherche radiobiologique met en jeu l'exposition soit de cellules bactériennes, de levures ou de cellules de mammifères à des doses graduées de rayonnement pour évaluer la réponse, soit d'animaux entiers ou de portions d'animaux vivants pour évaluer la réponse en fonction de la dose. L'exposition biologique peut également servir d'outil pour d'autres études, par exemple provoquer une immunosuppression pour évaluer une transplantation. L'irradiation a été effectuée dans le domaine de la recherche avec deux grands types d'irradiateurs : les dispositifs à faisceaux installés dans une salle blindée et les dispositifs autonomes avec blindage intégré. Les premiers sont similaires aux dispositifs

au césium ou au cobalt utilisés en radiothérapie mais sont placés dans une pièce blindée du laboratoire de recherche. Ils fournissent des débits de dose de 1 à 3 Gy/min à une distance de 50 à 80 cm. Quant aux seconds, ils sont installés dans une salle dédiée d'un laboratoire (voir figure 42).



FIG. 42. Irradiateurs de recherche de divers fabricants.

Les sources les plus couramment rencontrées dans la recherche sont cependant des sources de faible activité et/ou des sources utilisant des radio-isotopes de courte période. Les sources au tritium (^3H) et au ^{14}C sont souvent employées, mais ceux-ci émettent des rayonnements bêta faibles, entraînant ainsi des problèmes radiologiques moins graves en cas de perte de contrôle de la source. Nombre de ces sources sont utilisées pour la capture d'électrons ainsi qu'en chromatographie en phase gazeuse et en spectrométrie Mössbauer. Les exceptions notables sont les grandes sources (jusqu'à 1 PBq) au ^{60}Co et au ^{137}Cs employées pour l'irradiation ou la stérilisation. Bien que certaines installations d'irradiation puissent être d'une échelle similaire à celle d'une installation industrielle, la plupart d'entre elles ont des dispositifs fixes, autoblindés, qui sont conçus pour que les échantillons soient placés dans une chambre d'irradiation.

Les travaux de recherche sont souvent menés dans le cadre d'une thèse universitaire ou d'un contrat de financement particulier. Les équipements, notamment les sources de rayonnements, peuvent avoir été obtenus dans le cadre d'un projet donné. Une fois les travaux terminés ou le financement épuisé, il est possible que ces sources ne soient plus utilisées pendant un moment ou ne soient plus utiles et que la personne responsable quitte l'organisme. Dans de nombreux cas, elles sont entreposées, mais n'ont plus de « propriétaire » clairement désigné pour s'en charger dans cet organisme. Le principal problème concernant les sources consacrées à la recherche ou à l'enseignement survient lorsqu'elles sont retirées du service ou que le personnel compétent s'en va.

4.6.3. Utilisations militaires

Dans la plupart des pays, les utilisations militaires des sources radioactives ne sont pas soumises au contrôle réglementaire civil ordinaire. C'est pour cela et pour d'autres raisons que ces utilisations doivent être examinées séparément. Les sources utilisées dans les applications militaires peuvent appartenir à diverses catégories. Bien que de nombreuses utilisations soient similaires à celles recensées en médecine, dans l'industrie et le monde universitaire, certaines applications sont propres à l'armée ou servent à des activités beaucoup plus vastes que celles des dispositifs civils, non militaires comparables. Les exemples d'utilisations militaires comprennent :

- les générateurs thermoélectriques à radio-isotopes ;
- les sources pour entraînement de simulation d'attaque nucléaire ;

- le matériel technique (alliages de thorium) et les lampes à gaz ;
- les détecteurs à gaz ;
- le tritium et le ^{226}Ra dans les dispositifs lumineux (activités beaucoup plus importantes que dans les usages civils).

Il est probable que pour des raisons de sécurité, le stock dans l'armée soit différent du stock national ordinaire. Il faudra donc consulter directement les autorités militaires pour évaluer la situation.

4.7. MASSE ET DIMENSIONS DE DISPOSITIFS COURANTS

Le tableau 5 donne la masse et les dimensions de dispositifs courants utilisant des sources radioactives scellées.

TABLEAU 5. MASSE ET DIMENSIONS DE CERTAINS DISPOSITIFS COURANTS

Dispositif	Catégorie	Masse courante	Dimensions courantes	Observations
Usine de stérilisation industrielle	1	s.o.	Bâtiment de 100 m × 200 m × 50 m	
Dispositif de téléthérapie	1	500 à 1 000 kg	4 m de longueur × 2 m de largeur × 3 m de hauteur	
Irradiateur sanguin	1	1 500 à 3 500 kg	1 m de longueur × 1 m de largeur × 1,5 m de hauteur	
Dispositif de téléthérapie multifaisceaux (gamma knife)	1	20 000 kg	4 à 5 m de longueur × 2 m de largeur × 2,5 m de hauteur	Dispositif blindé
Irradiateur d'échantillons à petite échelle	1	1 000 à 6 000 kg	1,5 m de longueur × 1,5 m de largeur × 2 m de hauteur	
Irradiateur de semences	1	Chambre (démontée) 3 000 à 6 000 kg	1,5 m de longueur × 1,5 m de largeur × 2 m de hauteur	Peut être montée sur des véhicules
Générateurs thermoélectriques à radio-isotopes	1	500 à 1 000 kg	1,5 m de longueur × 1,5 m de largeur × 1,5 m de hauteur	À l'exception des stimulateurs cardiaques
Bouchon forgé de gammagraphie pétrolière à tête hémisphérique	2	500 à 1 000 g	20 à 60 mm de diamètre × 100-150 mm de longueur	
Bouchon forgé de diagraphie neutronique pétrolière à tête hémisphérique	2	400 à 1 000 g	20 à 60 mm de diamètre × 100 à 200 mm de longueur	
Projecteur de gammagraphie	2	8 à 35 kg	350 mm de longueur × 200 mm de largeur × 240 mm de hauteur	Utilisé pour les sources au ^{192}Ir , au ^{75}Se
Changeur de sources de gammagraphie	2	40 kg	250 mm de longueur × 210 mm de largeur × 340 mm de hauteur	Changeur de sources

TABLEAU 5. MASSE ET DIMENSIONS DE CERTAINS DISPOSITIFS COURANTS (cont.)

Dispositif	Catégorie	Masse courante	Dimensions courantes	Observations
Projecteur de gammagraphie (⁶⁰ Co)	2	100 à 200 kg	900 mm de longueur × 900 mm de largeur × 900 mm de hauteur	Dispositif semiportable au ⁶⁰ Co
Chenille de canalisation pour gammagraphie	2	50 à 100 kg	800 à 1 500 mm de longueur × 400 mm de largeur × 400 mm de hauteur	
Jauge de densité, d'épaisseur et de niveau à rayonnement gamma de haute énergie	3	20 à 400 kg	200 à 400 mm de diamètre × 300 à 700 mm de longueur	
Jauge gamma de densité, d'épaisseur et de niveau à basse énergie	3	20 à 50 kg	200 à 400 mm de diamètre × 300 à 700 mm de longueur	
Jauge de densité et d'épaisseur à rayonnement bêta	4	10 à 20 kg	100 à 300 mm de longueur × 100 à 300 mm de largeur × 100 à 300 mm de hauteur	
Jauge d'humidité de matériaux en vrac	3	10 à 1 000 kg	300 à 1 000 mm de longueur × 300 à 500 mm de largeur × 300 à 500 mm de hauteur	
Jauge d'humidité/de densité du sol	4	30 kg	200 mm de longueur × 300 mm de largeur × 1 000 mm	
Analyseur à fluorescence X	5	Portatif : 2 kg Contrôle de laboratoire et de processus : 20 à 100 kg	Portatif : 200 mm de longueur × 100 mm de largeur × 100 mm de hauteur Contrôle de laboratoire et de processus : 500 mm de longueur × 500 mm de largeur × 1 500 mm de hauteur	
Dispositif de curiethérapie	2	50 à 250 kg	300 à 600 mm de longueur × 300 à 600 mm de largeur × 800 à 1 500 mm de hauteur	
Éliminateurs d'électricité statique	4	Barres : jusqu'à 2 kg Pistolets : jusqu'à 500 g	Barres : jusqu'à 2 000 mm de longueur × 30 mm de largeur × 10 mm de profondeur Pistolets : 30 mm de diamètre, 80 mm de longueur	
Paratonnerre radioactif	5	2 à 10 kg	100 à 300 mm de diamètre × 500 à 1 000 mm de longueur	
Signal autolumineux	5	1-10 kg	Jusqu'à 600 mm de longueur × jusqu'à 200 mm de largeur × jusqu'à 100 mm de profondeur	
Détecteur de fumée	5	100 à 300 g	100 à 150 mm de diamètre × 15 à 30 mm de hauteur	

5. PRINCIPES ET PRESCRIPTIONS DE GESTION

L'option privilégiée pour la gestion des sources scellées retirées du service est de les recycler pour une utilisation ultérieure. Si cela n'est pas possible, l'autre option pour ces sources et toujours pour les sources usées est de les retourner à leur fournisseur. Si aucune autre utilisation n'est envisagée et qu'elles ne peuvent être retirée d'une autre manière du contrôle réglementaire, la seule option durable à long terme est le stockage définitif. À cet effet, les sources retirées du service pour lesquelles il n'y a aucune option de recyclage ou de rapatriement devraient être déclarées comme déchets radioactifs et gérées comme tels, conformément aux instruments juridiques internationaux pertinents, aux normes de sûreté et aux bonnes pratiques.

L'AIEA a publié un certain nombre de documents sur les responsabilités en matière de sûreté dans le cadre d'une infrastructure juridique et gouvernementale pour garantir la sûreté des sources dans ses États Membres :

- La publication sur les fondements de sûreté intitulée Principes fondamentaux de sûreté [28] définit les objectifs, les concepts et les principes de protection et de sûreté et jette les bases des prescriptions de sûreté de l'AIEA, y compris la responsabilité du gouvernement d'établir un cadre juridique de sûreté pour permettre le contrôle réglementaire des activités mettant en jeu des sources de rayonnements.
- La publication GSR Part 3, les NFI [11], fait obligation aux parties responsables, en particulier les titulaires d'enregistrements et de licences et les employeurs, de mettre en place un système de contrôle des sources de rayonnement pour garantir leur sûreté.
- La publication GSR Part 1, Cadre gouvernemental, législatif et réglementaire de la sûreté [29], couvre les aspects essentiels du cadre gouvernemental et législatif en vue de la mise en place d'un organisme de réglementation et des autres mesures nécessaires pour assurer un contrôle réglementaire efficace.
- Le Code de conduite [14] définit des principes directeurs permettant aux États Membres d'atteindre et de maintenir un niveau élevé de sûreté et de sécurité des sources radioactives. Un élément important de ce code est que les États Membres doivent veiller à ce que des dispositions soient prises en vue de la gestion sûre et de la protection sécurisée des sources radioactives une fois qu'elles sont retirées du service.
- Le guide de sûreté sur la sûreté des générateurs de rayonnement et des sources radioactives scellées [30] donne des orientations sur les responsabilités en matière de sûreté au sein de l'infrastructure juridique et gouvernementale, les méthodes d'évaluation de la sûreté et les mesures de conception et d'exploitation particulières à prendre pour garantir la sûreté tout au long la durée de vie d'une source de rayonnement.
- Le guide de sûreté sur le contrôle réglementaire des sources radioactives [31] contient des orientations pour la mise en œuvre d'une infrastructure réglementaire nationale nécessaire en vue d'atteindre un niveau approprié de protection et de sûreté des sources de rayonnement dans les domaines de la médecine, de l'industrie, de l'agriculture, de la recherche et de l'enseignement.

Il ressort des normes et des guides de sûreté ci-dessus que les éléments suivants du système national doivent être en place pour garantir la gestion sûre des sources radioactives retirées du service :

- un ensemble rationnel d'objectifs en matière de sûreté, de protection radiologique et de protection de l'environnement à partir desquels des normes et des critères peuvent être dérivés dans le système de contrôle réglementaire ;
- la détermination de toutes les parties concernées aux différentes étapes de la gestion des sources retirées du service et la détermination de leurs responsabilités ;
- l'identification des sources retirées du service existantes et prévues (registre national) ;

- Les ressources (financement, capacités techniques, dotation en personnel, qualifications et formation du personnel) ;
- le système de gestion ;
- l'information du public.

5.1. CONTRÔLE RÉGLEMENTAIRE

Quel que soit le type de processus, la gestion des sources retirées du service doit être conforme au cadre national de réglementation et d'autorisation ainsi qu'aux recommandations internationales. Il importe que les États Membres élaborent des mesures réglementaires appropriées pour la manutention, le conditionnement, le transport, l'entreposage et le stockage définitif au niveau national. Toutes ces pratiques nécessitent généralement des licences d'exploitation qui définissent la portée des opérations, les limites de possession de matières radioactives et les conditions particulières à respecter [32]. Les prescriptions légales en matière de tenue de registres doivent être déterminées, dans le cadre d'un système de gestion, qui lui-même peut faire partie des exigences d'octroi de licence.

La plupart des pays ont mis en place une législation et des réglementations régissant la radioprotection et la sûreté des sources radioactives. Il n'y a pas de législation spéciale sur la gestion des sources retirées du service et cet aspect est généralement inclus dans la législation sur la radioprotection ou la gestion des déchets. S'il est déterminé qu'une législation nouvelle ou supplémentaire est nécessaire, une mise en garde s'impose pour réduire au minimum les chevauchements ou les prescriptions conflictuelles en matière de radioprotection et de sûreté.

Les prescriptions générales peuvent ne pas être toutes nécessaires ou appropriées dans certaines circonstances particulières. Un État Membre doit décider dans quelle mesure les prescriptions sont applicables dans une situation donnée. En outre, les organisations concernées peuvent exister sous une structure différente ou avoir un nom différent. Afin d'assurer la conformité, il importe de pouvoir faire la distinction entre la nature réglementaire du travail et les aspects opérationnels.

Le contrôle réglementaire des sources tout au long de leur cycle de vie assurera la continuité du contrôle lorsqu'elles ne seront plus utilisées et deviendront potentiellement plus vulnérables à la perte. Les informations collectées dans le cadre du système de réglementation peuvent également être utiles pour prévoir le nombre et les types de sources qui ne sont plus utilisées, et ainsi déterminer les besoins futurs du système de gestion du stockage définitif.

5.2. RESPONSABILITÉS

Un concept fondamental de la législation est que la responsabilité première de la sûreté radiologique incombe à ceux qui sont autorisés à posséder et à utiliser, à fabriquer, à fournir ou à installer des sources de rayonnement. « La responsabilité première en matière de sûreté doit être assignée à l'exploitant » (référence [31], par. 2.3).

L'organisme de réglementation exige une autorisation, par l'octroi d'une licence, pour toutes les pratiques, autres que celles auxquelles s'applique une exemption, qui ne sont pas autrement désignées comme pouvant faire l'objet de la notification seule ou de l'enregistrement [11]. Dans tous les cas, les exploitants utilisant une source scellée sont, au minimum, tenus de présenter à l'appui de la notification et de la demande d'autorisation les informations figurant dans les prescriptions 3.32 et 3.33 de la publication GS-R-1 [29]. La plupart des États Membres ont en place des systèmes antérieurs à l'acquisition des sources utilisées actuellement. Cela signifie que toutes ces sources sont susceptibles d'être couvertes par une licence.

Le cycle de vie des sources scellées commence par la fabrication et se termine par le stockage définitif. Il comprend un certain nombre d'étapes séquentielles, illustrées à la figure 43. Un cycle de vie peut mettre en jeu une série d'entités dans diverses organisations, telles que l'organisme de réglementation,

le fabricant de la source, le fabricant du dispositif, le distributeur, l'utilisateur ou les utilisateurs (un utilisateur ou des utilisateurs suivants), l'organisme de traitement des déchets et l'exploitant d'une installation d'entreposage et/ou de stockage définitif. La participation potentielle d'un grand nombre d'organisations et leurs interactions signifient que les cycles de vie des sources sont de fait complexes et souvent difficiles à établir.

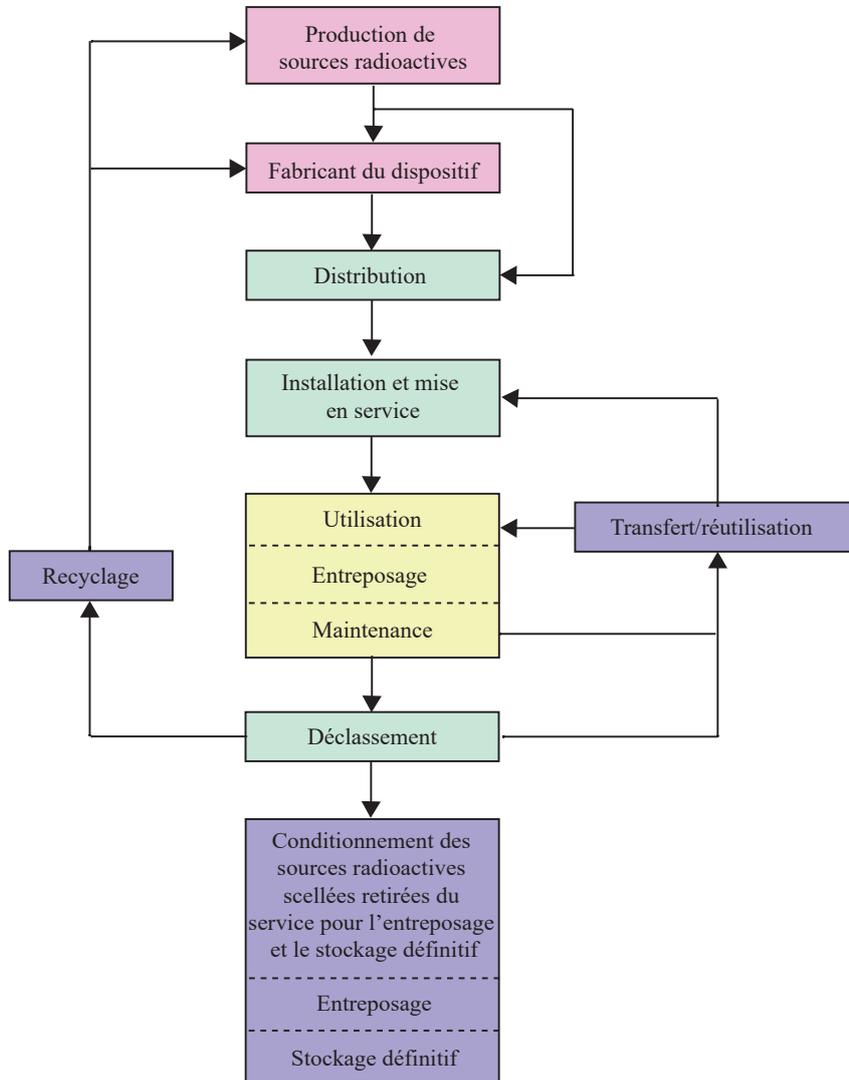


FIG. 43. Cycle de vie d'une source radioactive.

Le principal problème, tout au long du cycle de vie d'une source radioactive scellée, est de protéger les personnes ou les groupes contre une exposition involontaire aux rayonnements et de réduire au minimum les risques liés à l'utilisation malveillante de la source.

5.2.1. Fabricant de sources

Un *fabricant de sources* accepte généralement la propriété des matières radioactives au moment de la livraison depuis l'installation de production de radio-isotopes. Il est alors juridiquement responsable de la manutention sûre des matières radioactives en sa possession et du transfert de propriété ultérieur.

Le fabricant de sources est tenu de fournir à l'utilisateur et à l'organisme de réglementation un certificat contenant des informations complètes sur la source, telles que le modèle et le numéro de série, le radionucléide, l'activité, la date d'étalonnage, le type de capsule, le numéro du certificat de forme spéciale ainsi que sur lui-même en tant que fabricant. Ces données sont essentielles pour démontrer les informations particulières se rapportant à la source en vue du respect des prescriptions de gestion des sources lorsqu'elles seront retirées du service.

5.2.2. Fabricant de dispositifs/d'équipements

Un *fabricant de dispositifs/équipements* fournit le matériel dans lequel la source est chargée, soit avant son expédition sur le site de l'utilisateur, soit après son installation.

Il est tenu de respecter les normes nationales et internationales de sûreté de l'équipement, y compris l'approbation de conception de l'autorité de réglementation compétente. La réglementation lui fait en outre obligation de fournir à l'utilisateur toutes les informations nécessaires pour un fonctionnement et un entretien sûrs et appropriés de l'équipement. Cela comprend tous les renseignements pertinents sur la source et ses procédures de transport, y compris les moyens de la sécuriser dans un état sûr, les verrouillages et la préparation aux situations d'urgence.

Pour les dispositifs utilisant des sources radioactives de haute activité, tels que ceux de téléthérapie, le fabricant est tenu de fournir des services techniques liés au rechargement périodique des sources radioactives.

5.2.3. Distributeur

Un *distributeur* agréé par l'organisme de réglementation est chargé d'effectuer certaines opérations de transport et de fourniture conformément aux lois internationales relatives au transport de matières radioactives. Ces responsabilités pourraient inclure la nécessité de vérifier que le destinataire est une personne ou une entité autorisée à posséder des matières radioactives conformément à la réglementation nationale et aux prescriptions de notification applicables.

Pendant les opérations de transport et de livraison, les responsabilités sont partagées par le fabricant de la source/le fabriquant du dispositif (qui, selon les conditions de livraison, peut rester propriétaire de la source pendant le transport) et le distributeur.

5.2.4. Utilisateur

Un *utilisateur* accepte généralement la propriété de la matière brute au moment de la livraison par le distributeur. Les utilisateurs (titulaires d'enregistrements et de licences) sont responsables de l'établissement et de la mise en œuvre des mesures techniques et organisationnelles nécessaires pour garantir la sécurité et la sûreté des sources. L'utilisateur est juridiquement responsable de la manutention sûre de la matière radioactive en vertu de toutes les lois et licences applicables, et du transfert ultérieur de sa propriété. Les conditions de licence exigent généralement qu'il conserve en toute sécurité une copie des informations du certificat de la source fournie par le fabricant. Bien que cela ne soit pas généralement requis par une licence, l'utilisateur doit conserver tous les renseignements techniques fournis sur l'équipement par le fabricant.

Lorsque la source sera retirée du service, après un entreposage de courte durée sur site, elle sera transférée vers un autre endroit où elle pourra être entreposée pour une longue durée ou stockée définitivement. La propriété est ensuite transférée à une autre partie, comme un fabricant de sources ou un organisme central de gestion des déchets radioactifs. Si l'utilisateur entrepose la source avant un transfert officiel de propriété (entreposage temporaire), la responsabilité pour les questions de sûreté et de sécurité pendant l'entreposage provisoire de la source lui incombe.

5.2.5. Organisme central de gestion des déchets radioactifs

Un organisme central de gestion des déchets radioactifs assure la manutention, le conditionnement et l'entreposage des sources retirées du service provenant de diverses applications dans le pays. Il est juridiquement responsable du conditionnement et du stockage sûrs et sécurisés des sources dont il est propriétaire et fonctionne généralement sous des conditions de licence établies par un organisme de réglementation. Cette responsabilité prend fin lorsque la source s'est suffisamment désintégrée pour être stockée définitivement en tant que matière inoffensive, ou jusqu'à ce qu'elle soit légalement transférée à un autre organisme, tel qu'une installation de stockage définitif. Comme prescription de sa licence, l'organisme central de gestion des déchets radioactifs tient un inventaire à jour de toutes les sources en sa possession, y compris tous les détails particuliers fournis par le fabricant de la source.

Si un titulaire de licence est incapable de gérer des sources retirées du service, ou si la licence est révoquée, ou encore si le titulaire n'existe plus, l'organisme central de gestion peut devenir responsable de la gestion globale de ces sources, à la demande de l'organisme de réglementation.

Dans les grands pays, l'organisme central peut être remplacé par plusieurs organismes exploitants régionaux ayant les mêmes fonctions.

5.2.6. Installations de stockage définitif

Une *installation de stockage définitif* est juridiquement responsable de tous les déchets radioactifs, y compris les sources radioactives scellées retirées du service acceptées pour stockage définitif. Dans la plupart des pays, il s'agit d'une installation centralisée fournissant des services pour l'utilisation de ces sources reçues de tous les utilisateurs du pays. Elle peut effectuer certaines activités de conditionnement et des opérations associées sur le site ; dans ce cas, son permis d'exploitation devrait couvrir également ces activités et ces opérations le cas échéant.

5.3. REGISTRE DES SOURCES RADIOACTIVES SCÉLÉES

Une préoccupation particulière en ce qui concerne la gestion des sources radioactives scellées retirées du service est de s'assurer que les sources scellées sont correctement contrôlées après qu'elles ne sont plus utilisées. Cela nécessite le suivi de la source tout au long de son cycle de vie, des engagements pour son stockage définitif avant son importation, ainsi que l'établissement et la mise en œuvre d'un plan pour sa gestion sûre après qu'elle est déclarée retirée du service.

Le Code de conduite [13] appelle les organismes de réglementation nationaux à établir et à tenir à jour un *registre national* de certaines sources radioactives scellées. Comme indiqué au paragraphe 11 de ce code, ce registre devrait, au minimum, comprendre les sources radioactives de catégories 1 et 2. Afin de faciliter l'échange d'informations sur les sources radioactives entre les États Membres, il est important que ceux-ci s'efforcent d'harmoniser les formats de leurs registres.

Le titulaire de licence doit établir un *système de registre permettant de suivre toutes les sources en la possession des utilisateurs*, compatible avec le système de registre national. Ce système devrait être conçu de manière à ce que les données soient facilement accessibles, récupérables et sécurisées. Un système de registre acceptable peut être un système manuel (comme des fichiers de cartes) ou une base de données informatisée. Le titulaire de licence est tenu d'informer l'organisme de réglementation de tout changement important dans les renseignements contenus dans le système d'archivage. En outre, il devrait veiller à ce qu'il y ait une procédure pour communiquer régulièrement à cet organisme des renseignements détaillés sur l'état des sources ainsi que les informations de notification requises.

Un système de registre de sources doit, au minimum, contenir les informations suivantes [30] :

- a) numéro de série ou identifiant unique ;
- b) numéro de type du fabricant et référence relative aux endroits où on peut trouver des renseignements détaillés sur la construction ;
- c) radionucléide (symbole de l'élément et numéro isotopique) ;
- d) activité à une date précise ;
- e) état physique ;
- f) propriétés physiques et chimiques, y compris les principales émissions (alpha, bêta, gamma, n) ;
- g) emplacement de la source ;
- h) lorsque cela n'est pas évident dans les renseignements ci-dessus, des informations détaillées sur le dispositif ou l'équipement avec lequel la source est utilisée, si cela est essentiel pour la sûreté ;
- i) le cas échéant, un historique de l'utilisation de la source (par exemple un journal des opérations de maintenance de la source) ;
- j) informations détaillées sur la réception ou le transfert ou encore le stockage définitif de la source.

5.4. DÉCLARATION DE SOURCES COMME RETIRÉES DU SERVICE

Plusieurs facteurs peuvent conduire à retirer des sources radioactives du service. Certaines des principales raisons pour lesquelles une source est retirée du service ou considérée comme usée sont examinées plus en détail ci-dessous.

5.4.1. Décroissance d'activité

Toute source radioactive scellée a une activité minimale en dessous de laquelle elle n'est plus utile pour son objectif particulier et donc considérée comme usée (et retirée du service). Dans la plupart des applications, elle doit être remplacée lorsque l'activité initiale a diminué d'un certain facteur en fonction de l'application particulière. Les sources de radiographie industrielle contenant de l' ^{192}Ir , dont la période n'est que de 74 jours, sont généralement considérées comme usées dans les deux à trois mois suivant leur achat en raison de la désintégration radioactive, alors que les sources au ^{60}Co utilisées en radiographie industrielle ou en téléthérapie doivent être remplacées tous les 5 à 10 ans. La durée de vie actives des sources au ^{60}Co produites pour les irradiateurs industriels peut être de 15 à 20 ans. On continue généralement d'utiliser ces sources jusqu'à ce que leur activité diminue pour atteindre 10 à 15 % de leur valeur initiale. Bien que les sources usées puissent ne plus être utiles à l'usage initial, elles peuvent être encore très radioactives, posant un risque radiologique potentiel pour les personnes et l'environnement, même après plusieurs demi-vies.

5.4.2. Fuites ou dommages

Les sources qui fuient ou sont physiquement endommagées (par exemple pliées, corrodées, fissurées ou sérieusement rayées) sont considérées comme impropres à l'utilisation, immédiatement retirées du service, puis gérées comme déchets radioactifs.

5.4.3. Équipements obsolètes

Tous les équipements (dispositifs) finiront par atteindre la fin de leur vie utile. Même si la puissance de la source peut encore être adéquate, il se peut que l'équipement ne soit plus utilisable (par exemple jauge d'humidité/de densité dont les composants électroniques sont obsolètes). Une source radioactive associée à un équipement obsolète est considérée comme retirée du service.

5.4.4. Disponibilité d'autres technologies

Une source radioactive scellée est généralement fabriquée pour une fonction particulière. Cette fonction peut être le traitement d'une tumeur, l'évaluation de la qualité d'une soudure, le contrôle de procédés industriels ou la stérilisation de fournitures médicales jetables. La source fournit le rayonnement ionisant requis pour le processus. Même si c'est toujours le cas, on peut cesser d'utiliser le procédé si d'autres procédures permettant d'obtenir les résultats souhaités ont été mises au point. Dans la mesure du possible, les utilisateurs comme les fabricants s'orientent vers des technologies qui ne nécessitent pas de sources radioactives, par exemple :

- le remplacement d' ^{241}Am dans les détecteurs de fumée utilisant le rayonnement ionisant par des dispositifs optiques ;
- le passage aux détecteurs à rayons X dans les applications de contrôle de processus, en particulier celles nécessitant de ^{241}Am et du ^{244}Cm ;
- les méthodes de mesure de densité et de niveau par ultrasons plutôt que par l'utilisation du ^{137}Cs ;
- les accélérateurs linéaires en lieu et place de la téléthérapie au ^{60}Co .

La procédure de substitution pourrait éventuellement mettre en jeu un autre type de source plus facile à utiliser ou à gérer comme déchet à la fin de son cycle de vie⁴. Elle peut également employer un composé chimique⁵ plus stable, un niveau de rayonnement plus faible, des générateurs ou des accélérateurs de rayonnement ou de particules (machine à rayons X ou accélérateur linéaire) au lieu d'une matière radioactive, ou peut mettre en jeu une technique qui ne nécessite pas du tout de rayonnement ionisant.

5.4.5. Changements de priorités

Une source scellée est considérée comme retirée du service si l'expérience ou l'activité qui l'utilise est terminée ou interrompue. Certaines entreprises ou organisations peuvent changer de domaine d'activité ou mettre fin à leurs programmes de recherche, et de ce fait n'auront plus besoin de sources qu'elles utilisaient. Celles-ci sont considérées comme retirées du service, et leur propriété est alors transférée à un organisme autorisé pour réutilisation, conditionnement, entreposage ou stockage définitif éventuels.

5.4.6. Sources orphelines

Une source orpheline est une source radioactive qui n'est pas sous contrôle réglementaire, soit parce qu'elle ne l'a jamais été, soit parce qu'elle a été abandonnée, perdue, égarée, volée ou transférée à un autre endroit sans autorisation préalable [1, 14]. Les sources orphelines peuvent avoir de graves conséquences sur la santé publique et l'environnement. Une action immédiate (par exemple notification, recherche) est requise. Lorsqu'une source est découverte, elle doit être vérifiée et testée contre les fuites avant toute autre action de gestion. En outre, les sources récupérées par un tiers et identifiées comme radioactives mais non traçables jusqu'au détenteur autorisé sont considérées comme retirées du service.

⁴ Par exemple, le ^{137}Cs au lieu du ^{226}Ra pour la radiothérapie, l' ^{192}Ir plutôt que le ^{137}Cs pour la radiographie industrielle.

⁵ Par exemple, le ^{137}Cs sous forme de verre ou de céramique au lieu du CsCl .

5.5. FINANCEMENT

Les principales parties⁶ devraient veiller à ce que : « Des dispositions financières conformes aux prescriptions réglementaires pour la gestion sûre des sources retirées du service soient en place » [32]. Un État Membre doit s'assurer qu'une pratique ou une installation de gestion des déchets est financée de manière appropriée et qu'un mécanisme de financement est mis en place.

Étant donné que le stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service durera probablement plusieurs décennies (ou plus) dans le futur (peut-être après que ceux qui en sont à l'origine auront cessé leurs activités), il est prudent de collecter les ressources financières qui seront nécessaires pour les opérations futures pendant que les utilisateurs sont encore en activité. Les États Membres utilisent divers systèmes de financement pour assurer la disponibilité à long terme de ressources financières pour le déclassement et le stockage définitif. Les fonds et les réserves sont les deux mécanismes de financement les plus courants. Les ressources financières sont généralement conservées par des organismes indépendants des producteurs de déchets. Dans certains pays, le financement de la gestion des déchets radioactifs est garanti par le budget national.

5.5.1. Répartition des coûts

Toutes les parties qui possèdent des matières radioactives pendant le processus de fabrication, de transport, d'utilisation, de conditionnement et d'entreposage des sources transfèrent généralement la propriété de ces matières à une autre partie. L'utilisateur final de la source supportera normalement les coûts de gestion de la source retirée du service, qui peuvent être assez élevés, en particulier dans le cas des sources de haute activité (catégories 1 et 2) et des sources contenant des radionucléides à longue période. Le coût des conteneurs de transport et celui du transport lui-même sont également répercutés sur l'utilisateur, comme celui des sources et de leur remplacement. Ces dépenses, nécessaires pour répondre aux prescriptions légales et de sûreté, deviennent des coûts supplémentaires pour l'utilisateur. Cependant, l'État Membre est tenu de fournir des fonds publics, dans le cas des sources orphelines, lorsque des informations sur la propriété sont perdues ou lorsque des considérations de sûreté publique sont primordiales. Si le propriétaire d'une installation devient insolvable ou si une installation est fermée en raison d'un abandon, d'une guerre, d'une catastrophe naturelle, etc., la méthode supposée de financement du transfert de propriété de la source peut ne plus être possible. Des assurances ou des fonds d'urgence provenant d'organismes publics peuvent être disponibles pour aider dans ces circonstances, sinon, les frais de transfert de propriété devront être assumés par d'autres établissements qui n'auront peut-être pas profité des avantages pour lesquels la source a été achetée. Finalement, la source sera conservée dans l'organisme central de gestion des déchets radioactifs, où son activité diminuera jusqu'à un niveau sûr, ou elle sera conservée en attendant son transfert vers une installation de stockage définitif.

Les coûts de propriété et de transfert des matières radioactives pendant la fabrication et le remplacement d'une source scellée sont reflétés dans le prix d'achat des sources d'origine et de remplacement, car c'est généralement ainsi que le fabricant récupère ses coûts.

Lorsqu'une source est remplacée, le fabricant reprend généralement la source usée dans le cadre de la transaction. Cependant, lorsque l'installation est finalement déclassée, la propriété et le transfert de la source finale contenue dans l'équipement doivent être traités dans le cadre du coût pour l'utilisateur associé au retour de l'installation à l'utilisation générale. Essentiellement, le coût total de propriété et de transfert fait partie du coût total pour l'utilisateur de la fourniture du service pour lequel la source a été achetée. Pour les sources de haute activité, ces services comprennent la radiographie industrielle, l'irradiation des matériaux, la stérilisation et le traitement du cancer.

⁶ Les NFI [1] indiquent que : Les principales parties auxquelles incombent les responsabilités les plus importantes en ce qui concerne l'application des normes sont : a) les titulaires d'enregistrements ou de licences ; b) les employeurs.

5.5.2. Incertitude des coûts

L'utilisateur et le fabricant de la source supportent des coûts d'octroi de licence et des coûts d'exploitation dans le cadre des prescriptions réglementaires. Les organismes de réglementation délivrent des licences aux installations qui gèrent des matières radioactives et effectuent des inspections, et au moins une partie du coût de ces activités est répercutée sur l'exploitant sous forme de droits de licence. Les coûts de licence réglementaire pour une installation d'irradiation et pour le fabricant de la source sont généralement intégrés au prix des sources livrées à l'utilisateur, et les coûts de l'utilisateur deviennent des dépenses d'exploitation supportées pendant la période d'utilisation de la source. Le coût de l'autorisation des colis de transport et les frais de transport sont également répercutés sur l'utilisateur dans le coût de la source et de son remplacement. Ces dépenses, nécessaires pour répondre aux prescriptions légales et de sûreté, deviennent des coûts supplémentaires pour l'utilisateur.

Les coûts de manutention, de conditionnement et d'entreposage sont généralement fixés par l'organisme central de gestion des déchets radioactifs à un niveau réaliste pour éviter de compromettre les mesures de sûreté. Des coûts exorbitants peuvent pousser les organismes exploitants à agir de manière inappropriée soit en abandonnant illégalement les sources soit lors de leur stockage définitif. Les coûts exacts de conditionnement et d'entreposage des sources radioactives scellées ne peuvent être établis avec précision, mais peuvent être estimés. Des fonds suffisants pour la construction et l'exploitation des installations de conditionnement et d'entreposage sont une condition préalable à la gestion sûre des sources retirées du service. Des coûts supplémentaires pour tout reconditionnement des sources doivent également être pris en compte. Le coût de l'entreposage de longue durée, en attendant le stockage définitif, et celui du stockage sont des éléments essentiels de toute étude de coût.

5.5.3. Impossibilité de transférer la propriété

Au moment du déclassement des équipements, le fabricant ou le distributeur de la source d'origine peut ne pas être en activité, ni en mesure de récupérer la source en raison de l'âge ou de l'état de l'équipement, ou encore des modifications de la réglementation en vigueur. S'il n'est pas possible de transporter la source vers l'organisme central de gestion des déchets radioactifs, l'utilisateur devra l'entreposer en sûreté et en sécurité jusqu'à ce qu'une option appropriée soit disponible. Certes, le coût annuel ne sera probablement pas élevé, mais un entreposage prolongé entraînera des coûts de main-d'œuvre et d'entretien. La durée de l'entreposage pourrait dépasser la capacité de l'installation à assurer de manière fiable un entreposage sûr et sécurisé, voire même la durée de vie opérationnelle de l'installation. Une nouvelle (différente) autorisation (licence) pour l'entreposage d'une source radioactive scellée retirée du service devrait être demandée, et approuvée par l'organisme de réglementation. Dans ces conditions, le problème du coût de propriété et de transfert de la source est différé par l'entreposage temporaire, mais pas résolu.

5.6. CAPACITÉS TECHNIQUES

Des capacités techniques appropriées doivent être établies et maintenues sur chaque site où des sources sont manipulées ou gérées comme sources retirées du service. Ces capacités comprennent l'installation elle-même, l'équipement approprié et les compétences techniques du personnel. L'acquisition et l'exploitation des installations et des équipements doivent être proportionnées aux capacités techniques disponibles pour faciliter une opération efficace et sûre. La gestion des sources retirées du service est requise tant sur le site de l'utilisateur qu'au niveau de l'organisme central de gestion des déchets où les sources scellées sont traitées et entreposées, en attendant leur stockage définitif.

5.6.1. Site de l'utilisateur

Chaque utilisateur a besoin de capacités techniques pour collecter, manipuler, caractériser, séparer et entreposer en sûreté les sources en sa possession pour un court laps de temps. Il peut ne pas avoir besoin de savoir en détail comment la source retirée du service sera ultérieurement gérée si les activités de conditionnement et d'entreposage sont laissées aux exploitants des installations centralisées de conditionnement et d'entreposage. Toutefois, l'utilisateur devrait être informé des étapes ultérieures de la gestion de la source afin d'apprécier la nécessité de séparer ou de bien classer les sources pendant la collecte. Cela est également important pour éliminer la possibilité qu'il traite la source d'une manière qui pourrait rendre les futures procédures de gestion des déchets plus compliquées, plus coûteuses ou entraîner des risques inutiles supplémentaires.

5.6.2. Organisme central de gestion des déchets radioactifs

Étant donné que les opérations techniques les plus avancées (conditionnement et entreposage) sont effectuées à l'organisme central de gestion des déchets radioactifs, celui-ci devrait être doté de tous les équipements, outils et instruments nécessaires en fonction des tâches qui lui sont assignées et des caractéristiques des sources retirées du service acceptées pour le traitement. Les prescriptions relatives à l'équipement technique et quelques exemples utilisés dans cet organisme sont présentés dans les sections 7 à 10 ci-dessous.

5.6.3. Installations de stockage définitif

Une installation de stockage définitif accepte les sources radioactives scellées retirées du service pour stockage définitif et, pour s'acquitter de cette fonction, elle doit être dotée d'équipements de manutention et de levage appropriés. La conception d'une telle installation peut comprendre différentes barrières artificielles. Certaines mesures doivent être prises pour soutenir les propriétés de ces barrières en fonction de l'intention visée dans la conception. En cas de contrôle institutionnel, sa durabilité doit être assurée. Les prescriptions de conception d'une installation de stockage définitif sont présentées à la section 12.

5.7. FORMATION DU PERSONNEL

Les processus de manutention et de conditionnement nécessitent un personnel qualifié possédant les connaissances techniques et une expérience pratique appropriées, capable de faire preuve d'autodiscipline et d'assumer la responsabilité pour l'exécution d'un travail de grande qualité. Il importe en outre que le personnel comprenne la conception, la construction et le montage de la source dans le dispositif ainsi que la conception et la fonction de celui-ci. Cela est particulièrement vrai lorsqu'on tente de retirer une source de ce dispositif. Étant donné que ce travail nécessite souvent un niveau élevé de manutention, le personnel concerné doit être en bonne forme physique.

Il n'est pas possible de recommander le nombre de personnes et le type de compétences nécessaires pour diverses opérations de gestion de sources radioactives scellées retirées du service. Les recommandations générales de l'AIEA ayant trait aux qualifications du personnel en ce qui concerne les activités radiologiques telles que les tâches de conditionnement [15] sont présentées au tableau 6.

TABLEAU 6. QUALIFICATIONS ET EXPÉRIENCE DU PERSONNEL [15]

Personnel	Qualifications/expérience ^a
Responsable des opérations	Formation technique adéquate, expérience en gestion des sources radioactives scellées retirées du service
Responsable/superviseur de la radioprotection	Expérience des procédures et règlements de radioprotection ^b
Responsable des tâches	Expérience dans des méthodes de conditionnement données, les opérations de conditionnement et le contrôle de la qualité ^c
Opérateur qualifié	Expérience pratique de la manutention des matières radioactives ^c

^a Des programmes de formation devraient être organisés selon que de besoin.

^b Le personnel de radioprotection devrait avoir une expérience pratique concernant les types de sources radioactives scellées à conditionner et les activités pertinentes. Une expérience spéciale sur les dispositifs desquels les sources seront retirées est souhaitée, mais, au minimum, une expérience concernant des sources et des dispositifs similaires est requise.

^c Les opérateurs qui enlèveront les sources du dispositif doivent avoir une formation et une expérience relatives à tous les outils et équipements à retirer, et lorsque cela n'est pas du tout possible, une expérience pratique concernant les dispositifs particuliers desquels les sources seront enlevées. Cela est particulièrement important lorsque le conditionnement de sources de haute activité est prévu, ou pour le retrait de sources logées dans des jauges, divers instruments ou d'autres dispositifs.

Contrairement aux activités générales de radioprotection, la manutention des sources met en jeu des matières radioactives de niveaux d'activités plus élevés dont les concentrations sont telles que les risques d'exposition et de dispersion sont importants en cas d'acte inapproprié ou imprévu. Ces préoccupations doivent être évaluées pour désigner des travailleurs qualifiés pour l'exécution de ces activités.

La formation des opérateurs et du personnel de radioprotection à la manutention et au conditionnement des sources devrait porter spécialement sur les types particuliers de dispositifs à manipuler et de sources à conditionner, et lorsque cela est possible, les travaux doivent s'appuyer sur le document définissant les étapes et les techniques de retrait de la source, si besoin. De préférence, ce document proviendra du fabricant du dispositif ; à défaut, l'utilisation de documents élaborés par des personnes expérimentées dans l'exécution des travaux est une solution raisonnable. La formation et l'expérience devraient être suffisantes pour que ceux qui effectuent le travail reconnaissent les types et les degrés de dangers radiologiques à chaque étape du travail ; les différences entre les dispositifs produits par différents fabricants dans le même but, et les actions à entreprendre en cas de problème ou d'anomalie dans l'exécution de ce travail. Si un personnel de sécurité est nécessaire (par exemple pendant l'entreposage), il doit bénéficier d'une formation de base en radioprotection et être familiarisé avec les procédures d'urgence.

D'une manière générale, l'organisme de réglementation n'est pas responsable de l'exploitation des installations de gestion des déchets ; cependant, il doit posséder les connaissances et l'expérience nécessaires pour appliquer les lois et règlements et donner des orientations et des directives claires aux exploitants de ces installations.

5.8. SYSTÈME DE GESTION

Le principe 3 des Principes fondamentaux de sûreté [28] stipule : « Une capacité de direction et de gestion efficace de la sûreté doit être mise en place et maintenue dans les organismes qui s'occupent des risques radiologiques et des installations et activités qui entraînent de tels risques. La sûreté doit être

assurée et maintenue au moyen d'un système de gestion efficace »⁷. Le système de gestion est l'ensemble d'éléments interdépendants ou interactifs qui sert à établir les politiques et les objectifs et permet d'atteindre ceux-ci de façon sûre, efficiente et efficace. Il doit intégrer tous les éléments de la gestion afin, non seulement, que les prescriptions de sûreté soient établies et appliquées de façon cohérente par rapport aux autres prescriptions, y compris celles concernant la performance humaine, la qualité, la sécurité, la performance économique, mais aussi que les autres prescriptions ou exigences économiques ne nuisent pas à la sûreté. Le système de gestion doit également permettre la promotion d'une culture de sûreté, l'évaluation régulière de la performance en matière de sûreté et l'application des enseignements tirés de l'expérience. Il doit être en harmonie avec les buts de l'organisme en matière de sûreté et la réalisation de ces buts.

Les prescriptions générales relatives au système de gestion sont établies dans la publication « Prescriptions de sûreté : Système de gestion des installations et des activités » [32] et les recommandations du guide complémentaire « Application of the Management System for Facilities and Activities » [33], qui remplace le code sur l'assurance de la qualité [34] qui le précède. Des orientations sur l'application du système de gestion pour le traitement, la manutention et l'entreposage des déchets radioactifs sont présentées dans la référence [35]. Par ailleurs, des orientations sur l'application de ce système en vue du stockage définitif des déchets radioactifs sont énoncées dans la référence [36]. Les prescriptions de base pour la radioprotection sont établies dans la référence [11] et celles relatives à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence figurent dans la référence [37].

5.8.1. Problèmes liés au système de gestion

La gestion des sources radioactives scellées retirées du service met en jeu un éventail d'activités techniques et de gestion et peut s'étendre sur une très longue période. Ces caractéristiques s'accompagnent d'une série de problèmes pour l'élaboration et la mise en œuvre de systèmes de gestion efficaces. Les aspects suivants doivent faire l'objet d'une attention particulière lors de l'élaboration d'un système de gestion des sources radioactives scellées retirées du service :

- a) La mise à disposition de ressources financières et les dispositions organisationnelles pour la gestion des sources radioactives scellées retirées du service pourraient ne pas bénéficier d'une attention suffisante si elles sont dissociées des avantages tirés de l'activité qui en est à la base. L'organisation et le financement des activités nécessaires de gestion de ces sources pourraient être beaucoup plus difficiles à mettre en place ultérieurement.
- b) Les sources radioactives scellées retirées du service peuvent être gérées de manière sûre à titre provisoire, dans de nombreux cas pendant de longues périodes. En conséquence, la sélection et la mise en œuvre de solutions définitives peuvent être ajournées grâce à une série de reports de courte durée pour permettre une évaluation plus poussée des options.
- c) Si le stockage définitif n'a pas été retenu pour les sources radioactives scellées retirées du service, il peut être difficile de définir non seulement la forme préférable des colis de ces sources à confectionner et à conserver pendant l'entreposage, mais aussi la forme acceptable des colis pour ledit stockage. Dans ces conditions, le choix des méthodes de conditionnement devrait tenir compte de deux préoccupations. Premièrement, il faudrait éviter de fermer la porte à de futures options de stockage définitif (par exemple en choisissant de faire un type de colis intermédiaire à la fois impropre au stockage définitif et difficile à convertir en un colis final adapté à celui-ci). Deuxièmement, il ne faudrait pas prendre prétexte de l'incertitude entourant la décision finale pour ne pas prendre les mesures appropriées en vue de la gestion sûre et acceptable sur le plan

⁷ On parle aujourd'hui de « système de gestion » plutôt que d'« assurance de la qualité ». L'expression « système de gestion » englobe et couvre une évolution d'approche de la notion initiale de « contrôle de la qualité » (contrôler la qualité des produits) à celle d'« assurance de la qualité » (système permettant de garantir la qualité des produits) et de « gestion de la qualité » (système visant à gérer la qualité).

environnemental des sources radioactives scellées retirées du service en attendant leur stockage définitif.

Les systèmes de gestion des activités relatives aux sources radioactives scellées retirées du service devraient encourager l'adoption d'approches et de solutions unifiées ainsi que des meilleures pratiques internationales en raison non seulement de la nécessité d'assurer la continuité entre les générations humaines successives mais également de l'incertitude à long terme des structures organisationnelles, nationales et internationales.

5.8.2. Procédures du système de gestion

Le système de gestion devrait couvrir toutes les activités à effectuer aux fins de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service, qu'elles comportent un ou plusieurs volets [33]. Il devrait en outre fournir l'assurance que l'activité (par exemple le conditionnement) ou le produit (par exemple le colis de sources) sera conforme à toutes les prescriptions applicables, en respectant les principes de sûreté. Ce système devrait inclure les mesures à prendre si des colis de sources radioactives scellées retirées du service non conformes sont confectionnés.

Les procédures de gestion à établir et à appliquer dans le cadre de ce système comprennent :

- a) une approche graduée ;
- b) la documentation et la tenue de dossiers ;
- c) l'élaboration et le contrôle des processus ;
- d) les inspections et les essais ;
- e) les acquisitions ;
- f) les actions à mener en cas de non-conformité et les actions correctives ;
- g) les examens du système de gestion.

5.8.3. Approche graduée

Les organismes intervenant dans la gestion des sources radioactives scellées retirées du service devraient déterminer l'importance relative des diverses activités, des installations, des équipements et des colis pour respecter les prescriptions générales concernant la sûreté, la santé, l'environnement, la sécurité, la qualité et la performance économique, étant entendu que la sûreté et la protection de l'environnement revêtent une importance primordiale. Les prescriptions du système de gestion doivent être appliquées de manière graduée pour déployer les ressources appropriées compte tenu des facteurs suivants :

- l'importance et la complexité de chaque produit ou de chaque activité ;
- les dangers et l'impact potentiel (risque) associé à chaque produit et à chaque activité sur la sûreté, la santé, l'environnement, la sécurité, la qualité et les paramètres économiques ;
- les conséquences possibles de la défaillance d'un produit ou de l'exécution inappropriée d'une activité.

L'approche graduée est destinée à guider le degré de contrôle appliqué à un élément par rapport à l'importance de sa fonction requise. Elle ne devrait pas servir à justifier la non-application de tous les éléments du système de gestion nécessaires ou des contrôles de la qualité requis. Cette approche signifie que la rigueur des contrôles permettant d'évaluer l'adéquation de ces activités est proportionnée à l'importance de celles-ci.

5.8.4. Gestion des dossiers

L'ampleur et la complexité des activités de gestion des sources radioactives scellées retirées du service varient. En outre, ces activités peuvent mettre en jeu un certain nombre d'organisations et se poursuivre sur de longues périodes (par exemple, l'entreposage en attendant le stockage définitif). Une attention particulière devrait être accordée au fait que les documents utilisés pour contrôler les processus de travail devraient rester pertinents, à jour, compréhensibles et disponibles pour les diverses organisations et dans les situations dans lesquelles ils sont et seront utilisés.

Des dossiers complets pour toutes les étapes de la gestion des sources sont essentiels pour référence future. Ils comprendront les informations sur l'origine et les caractéristiques de la source, les procédures techniques appliquées, les modèles de capsules, le blindage, les conteneurs, les emballages et les suremballages, ainsi que les données sur le lieu et les conditions d'entreposage, y compris les évaluations, les inspections et les vérifications relatives à toutes les activités. Toutes ces données seront nécessaires plus tard pour étayer les décisions ultérieures sur la question de savoir s'il faut stocker directement les sources conditionnées ou les reconditionner pour respecter les critères d'acceptation des déchets en vigueur pour l'installation de stockage définitif.

Les autorités responsables, les utilisateurs de sources et les exploitants des installations de gestion des déchets sont tenus d'établir et de conserver une documentation et des dossiers conformes aux prescriptions légales et de gestion et à leurs propres besoins. Ces dossiers doivent être conservés de manière à pouvoir être récupérés ultérieurement par des personnes autres que le personnel ayant participé initialement aux opérations, et si possible sans qu'il soit nécessaire de consulter ceux qui les ont élaborés. Les dispositions relatives à la conservation des dossiers prévoient notamment, mais pas seulement :

- la désignation des dossiers comme permanents ou temporaires ;
- la conservation des dossiers temporaires pendant une durée spécifiée ;
- la conservation des dossiers permanents à perpétuité ;
- la désignation de la méthode de conservation des dossiers ;
- la récupérabilité des dossiers ;
- des systèmes et des processus de sécurité suffisants pour empêcher l'enlèvement ou la modification non autorisés des dossiers.

Des copies papier, des microfiches, des supports optiques et/ou magnétiques bien conservés sont des options possibles pour la conservation des données pertinentes. Au moins deux supports et deux emplacements de conservation de dossiers sont essentiels pour la diversité et la fiabilité. Les dossiers doivent être mis à jour et transférés à mesure que la technologie d'enregistrement évolue.

Les dossiers relatifs aux sources doivent être inclus avec des informations détaillées sur le processus de conditionnement pour chaque colis. Les données enregistrées doivent inclure une description de la procédure de conditionnement utilisée et les noms des membres de l'équipe qui ont effectué l'opération. Tous les anciens dossiers trouvés après le conditionnement doivent être ajoutés aux informations sur chaque colis de déchets. Les dossiers photographiques peuvent s'avérer précieux lors de l'examen de la documentation pour la planification du stockage définitif.

5.8.5. Élaboration et contrôle des processus

Le système de gestion devrait être formalisé pour garantir que les installations de gestion des sources radioactives scellées retirées du service seront conçues, construites et exploitées de manière sûre conformément aux prescriptions spécifiées ; que les colis de sources radioactives scellées retirées du service reçus seront confectionnés de la même manière cohérente ; que les prescriptions relatives à l'acceptation des déchets pour le transport, l'entreposage et le stockage définitif seront respectées ; et que tous les règlements et conditions ayant trait à la licence seront satisfaits.

La direction devrait s'assurer que toutes les activités sont des processus qui peuvent être planifiés, exécutés, évalués et améliorés, tout en reconnaissant que chaque personne effectuant ces activités est responsable de la qualité.

Le contrôle de la performance des installations de gestion des sources radioactives scellées retirées du service comprend des éléments tels que le contrôle et la vérification de la conception, l'examen par des pairs, la collecte de données et le contrôle des logiciels, les spécifications des emballages de ces sources et le contrôle des biens et services achetés. Les caractéristiques de gestion de la performance évaluent également :

- la performance et les qualifications du personnel, et l'acceptation des articles et des services ;
- le contrôle des processus de travail, y compris les interfaces entre la production, la récupération, le traitement, l'entreposage et le stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service ;
- les opérations d'entreposage, de manutention et d'expédition pour éviter les accidents, la dégradation des conteneurs, et assurer la validité des opérations d'analyse ;
- le contrôle des colis de sources radioactives scellées retirées du service et de l'état opérationnel, y compris les colis non conformes et les équipements opérationnels de qualité inférieure ;
- l'identification et le contrôle des éléments importants pour la sûreté, y compris les inspections et les essais de réception ;
- les points d'arrêt d'inspection, la surveillance et le suivi des processus ;
- l'identification des zones critiques pour l'inspection ;
- le contrôle des équipements de mesure et d'essai.

5.9. PRÉPARATION ET CONDUITE DES INTERVENTIONS D'URGENCE

S'il y a un risque d'accidents pouvant entraîner une exposition non planifiée de personne (les sources manipulées peuvent s'échapper de leur blindage ou commencer à fuir pendant les opérations), l'exploitant devrait s'assurer qu'un plan d'urgence adapté au stock de sources et à ses risques est élaboré, opérationnel et actualisé. Ce plan doit définir les responsabilités sur site et tenir compte des responsabilités hors site des autres organismes concernés participant à sa mise en œuvre.

Les États Membres doivent également prévoir la planification et la préparation de la conduite des interventions d'urgence et prendre les dispositions qui pourraient s'avérer nécessaires pour intervenir en cas d'accident [37 à 39]. Dans certains cas, les capacités d'intervention d'urgence existant dans le pays sont raisonnablement bien adéquates pour intervenir à un niveau approprié (c'est-à-dire les services de communication, de protection anti-incendie, de contrôle de la circulation, d'ambulance et de soins médicaux). Il est de la responsabilité des exploitants et de l'organisme de réglementation d'informer les autorités locales et le personnel d'intervention d'urgence de toute nouvelle activité dans leur zone. Ils sont alors informés de la mise en place de la nouvelle installation et peuvent évaluer les équipements et les services fournis. L'État Membre peut envisager de fournir un financement supplémentaire aux organismes locaux d'intervention d'urgence afin de répondre à tout besoin supplémentaire qui pourrait survenir. L'examen des plans de secours et d'urgence est un élément essentiel de la planification du travail avec des sources scellées qui doivent être manipulées.

5.10. SÉCURITÉ DES SOURCES RADIOACTIVES

La sécurité des sources s'entend des mesures destinées à empêcher un accès non autorisé ou des dommages aux sources radioactives, ainsi que la perte, le vol et la cession non autorisée de ces sources [14]. La sécurité des sources est essentielle et constitue un élément important pour garantir leur sûreté. Cependant, le fait qu'une source radioactive soit sécurisée, c'est-à-dire maintenue sous contrôle

et protégée physiquement, ne signifie pas nécessairement qu'elle est également sûre et ne nuira pas aux personnes.

Les recommandations de la publication n° 14 de la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA sur les matières radioactives et les installations associées [40], son Guide d'application n° 11 sur la sécurité des sources radioactives [25] et les NFI [11] ont établi les prescriptions relatives à la sécurité des sources radioactives qui complètent les prescriptions générales de sûreté radiologique qui s'appliquent à toutes les sources. Les NFI exigent, entre autres, que les sources radioactives soient conservées en sécurité afin d'éviter le vol ou les dommages en veillant à ce que le contrôle de la source ne soit pas perdu, qu'une source ne soit transférée que si le destinataire possède une autorisation valide et qu'un inventaire périodique des sources mobiles soit effectué à des intervalles appropriés pour confirmer qu'elles se trouvent dans leurs emplacements autorisés et sont en sécurité.

Face à la menace mondiale, l'AIEA a récemment renouvelé sa stratégie et étendu ses activités liées à la sécurité des sources radioactives. Cette stratégie renouvelée appelle à la création et au renforcement des infrastructures réglementaires nationales afin de garantir que les sources radioactives importantes sont localisées, enregistrées, sécurisées et contrôlées pendant toute la durée de leur cycle de vie.

En ce qui concerne la sécurité des sources radioactives, il est reconnu qu'il existe un équilibre nécessaire entre la gestion sûre et sécurisée de ces sources et la contribution à leur utilisation bénéfique. Ainsi, le niveau de sécurité doit être proportionné à celui de la menace et au risque associé à l'acquisition non autorisée de la source.

Un programme complet visant à lutter contre l'utilisation malveillante des sources radioactives doit prendre en considération un large éventail de questions, notamment : la conception et la fabrication appropriées des sources, les divers moyens d'acquisition des sources, la prévention de l'utilisation malveillante de toute source acquise et l'atténuation des conséquences en cas d'utilisation malveillante.

La confidentialité des informations revêt également une importance capitale. Chaque État Membre doit prendre les mesures appropriées compatibles avec son droit interne pour protéger le caractère confidentiel de tout renseignement qu'il reçoit à titre confidentiel d'un autre État Membre en vertu des dispositions du Code de conduite ou à l'occasion de sa participation à une activité exécutée en application de ce code. Si un État Membre communique à titre confidentiel des informations à des organisations internationales, des mesures doivent être prises pour protéger le caractère confidentiel de ces informations. Un État Membre qui a reçu des renseignements à titre confidentiel d'un autre État Membre ne devrait communiquer ceux-ci à des tiers qu'avec le consentement de cet autre État Membre. Un État Membre n'est pas tenu de fournir des informations que son droit interne ne permet pas de communiquer ou qui compromettraient sa sécurité.

La publication n° 11 de la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA, qui porte sur la sécurité des sources radioactives [25], propose des orientations pour la mise en œuvre des mesures de sécurité de ces sources. Elle fournit également des conseils sur la mise en œuvre des dispositions du Code de conduite [14] ayant trait à la sécurité. Ce document comprend des orientations et des mesures recommandées pour la prévention et la détection d'actes malveillants mettant en jeu des sources radioactives et pour l'intervention en cas de tels actes. Il aidera aussi à prévenir la perte du contrôle de ces sources.

5.11. CONTRÔLE DE LA CRITICITÉ

Lorsque de nombreuses sources scellées contenant des nucléides fissiles sont collectées, emballées et entreposées, les utilisateurs devraient évaluer les quantités effectives de matières contenues dans chaque colis pour l'entreposage ou le stockage définitif. Les critères d'acceptation des installations d'entreposage et des installations de stockage définitif centralisées comportent généralement des limites aux quantités et aux colis acceptés. Les utilisateurs qui entreposent des sources contenant des matières fissiles sur leurs propres sites peuvent obtenir l'aide de l'AIEA pour déterminer les limites de sûreté pour les sources en leur possession.

5.12. CONTRÔLE RADIOLOGIQUE

Les zones de traitement et d'entreposage doivent être contrôlées comme des zones radiologiques afin de réduire au minimum l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants et de limiter la propagation de la contamination radioactive, le cas échéant. Des mesures de la contamination et des levés radiologiques de la zone de travail doivent être effectués régulièrement pour vérifier que les prescriptions radiologiques sont respectées [41, 42]. Par ailleurs, si des sources scellées contenant des nucléides à longue période, volatils ou radiotoxiques (par exemple du radium) sont entreposées, les niveaux d'activité dans l'air doivent être surveillés. La détection d'une contamination de l'air ou de surface est une indication de la présence de sources qui fuient. Toute anomalie doit être explorée et des mesures appropriées doivent être prises. En fonction des prescriptions locales ayant trait au site, il faudrait notifier l'organisme de réglementation.

Les opérateurs devraient étudier la combinaison appropriée de moniteurs de zone, de moniteurs portatifs installés dans la zone de travail, et de dosimétrie du personnel, y compris la dosimétrie électronique, le cas échéant. Les prescriptions particulières de radioprotection comprennent, mais pas seulement, les suivantes :

- l'installation et l'entretien du matériel de contrôle radiologique approprié dans la zone de travail immédiate ;
 - l'utilisation d'instruments d'alarme, s'ils sont disponibles, en particulier si les tâches à effectuer peuvent entraîner des changements rapides des conditions radiologiques ;
 - le port des dosimètres personnels comme indiqué ;
- l'évaluation des niveaux de contamination à chaque étape d'une opération où une barrière à la dispersion de la contamination est retirée ou ouverte ;
 - l'établissement de niveaux de contamination admissibles clairs pour chaque étape des travaux prévus ;
 - la mise en œuvre immédiate des mesures prévues lorsque les niveaux de contamination dépassent les niveaux admissibles et la suspension ou l'arrêt du travail comme indiqué dans les mesures de contrôle du travail.

5.13. PROBLÈMES RENCONTRÉS ET ENSEIGNEMENTS TIRÉS

Certaines questions peuvent entraîner des problèmes potentiels dans la gestion sûre des sources radioactives scellées retirées du service.

5.13.1. Particularités du système de réglementation

Le système de contrôle réglementaire est essentiel pour la sûreté et la sécurité des sources radioactives. Toute évaluation de la sûreté et de la sécurité de ces sources dans un pays doit commencer par un examen du degré actuel et passé de contrôle réglementaire de ces matières. De nombreux pays utilisaient des sources radioactives avant la mise en place de leurs infrastructures réglementaires existantes. En outre, les infrastructures sont parfois modifiées, réexaminées et mises en conformité avec les nouvelles réalités technologiques, juridiques et politiques. Ainsi, l'infrastructure réglementaire est en évolution constante dans tous les pays, et la probabilité de perte de contrôle des sources dépend non seulement de l'utilisation historique de celles-ci, mais aussi de l'état de cette infrastructure en fonction de l'évolution de l'infrastructure réglementaire avec le temps.

Lors de la détermination et de l'analyse de l'infrastructure réglementaire, il est extrêmement utile d'accorder une attention particulière aux éléments qui influent directement sur le risque de perte de contrôle des sources, et notamment les sources des catégories à haut risque [43]. Ces éléments comprendront les

aspects tels que : l'octroi de licence, l'importation, la possession, l'utilisation et le stockage définitif des sources radioactives. Une bonne partie des renseignements sera disponible dans la réglementation, au niveau des organismes de réglementation ou d'autres organisations qui ont une fonction particulière de supervision en ce qui concerne les rayonnements ou les matières radioactives. Cependant, s'agissant des autres informations pertinentes, telles que les vérifications des compétences et de la légitimité de ceux qui souhaitent détenir et utiliser des sources, il peut s'avérer nécessaire de chercher dans d'autres législations et du côté d'autres organismes de réglementation ou de renseignement.

Pour montrer l'importance du degré de contrôle réglementaire, considérons le problème courant du transfert par inadvertance d'une jauge industrielle à une usine de recyclage de ferraille [43]. C'est un problème de plus en plus fréquent qui, dans le passé, a causé des décès et des blessures graves et nécessité des travaux de décontamination coûteux. Il s'explique par de nombreuses raisons, mais fondamentalement, met en jeu deux insuffisances réglementaires fondamentales :

- 1) l'absence d'un contrôle réglementaire efficace à travers la notification ou l'autorisation et l'inspection ;
- 2) l'absence de prescriptions réglementaires de la sécurité et de la responsabilité des sources ou de mesures prises pour les imposer.

Ce problème particulier semble plus aigu dans les pays où l'infrastructure réglementaire est limitée ou pratiquement inexistante. Les problèmes courants liés aux sources ont été déterminés par l'AIEA [43] et sont énumérés ci-dessous sans aucun ordre particulier :

- l'absence de lois et de règlements appropriés régissant le contrôle des sources radioactives ;
- le fait que l'organisme de réglementation n'est pas indépendant ;
- l'absence de procédure d'autorisation, de licence ou d'enregistrement pour les sources radioactives ou l'inadéquation de ces procédures ;
- l'absence d'autorisation particulière ou de licence pour les sources radioactives des structures gouvernementales ;
- l'absence d'inspections, d'application et de suivi ou leur inadéquation ;
- une structure de frais de licence qui encourage les comportements indésirables de la part des utilisateurs ;
- le fait que les efforts de réglementation ne sont pas hiérarchisés, le même volume de travail étant dévolu à toutes les sources quel que soit leur danger potentiel ;
- la hiérarchisation des ressources en fonction des régions géographiques, politiques ou de l'utilisation, plutôt que des catégories des sources.

Il existe des différences majeures dans l'infrastructure réglementaire des différents États Membres. Ainsi, alors que la totalité ou la plupart des activités mettant en jeu des sources scellées relèvent de la responsabilité d'un seul organisme de réglementation dans quelques pays, plusieurs pays ont au moins deux organismes de réglementation qui se partagent les responsabilités pour différentes activités ou étapes du cycle de vie de la source.

La complexité de la situation lorsqu'il y a plusieurs organismes de réglementation rend difficile le contrôle général des sources scellées et il faut un degré élevé de communication pour la mise en œuvre efficace de la politique de gestion des sources. Par exemple, lorsque l'approbation des transferts, des importations, du transport, etc., des sources est obtenue d'un organisme de réglementation autre que celui qui délivre les licences, il est peu probable que l'on puisse comparer le document d'approbation du transfert proposé à la licence du destinataire. Le même problème peut également se poser dans un grand organisme de réglementation où des départements distincts sont responsables de différentes activités. Certains États Membres ont mis en place un système d'octroi de licences à période fixe, lequel a comme avantage qu'il alerte les utilisateurs pour qu'ils examinent les stocks, le statut, le système de gestion,

etc., des sources, et permet à l'organisme de réglementation d'avoir des registres d'utilisateurs à jour. Toutefois, le processus de renouvellement des licences ne doit pas être inutilement long.

5.13.2. Qualité du registre des sources

La mise en place et la qualité d'un registre national des sources radioactives sera un indicateur primordial de la probabilité de problèmes de gestion des sources radioactives scellées retirées du service dans un pays. En principe, on peut utiliser les informations suivantes pour dresser une liste des sources [43] :

- les inventaires de sources tenus par les utilisateurs (dans certains cadres réglementaires) ;
- les registres des fabricants de sources ;
- les registres des distributeurs de sources ;
- les registres des entreprises qui entretiennent des dispositifs renfermant des sources ;
- les registres des sociétés de transport routier ou maritime, y compris les déclarations douanières ;
- les informations contenues dans les rapports et les notifications d'événements ;
- les renseignements contenus dans les registres de licences d'utilisateurs.

Les informations ainsi recueillies sur les sources radioactives seront probablement incomplètes. Par exemple, les registres peuvent uniquement faire état de l'existence d'un dispositif, mais pas de la source ou des sources de ce dispositif. Plusieurs sources distinctes peuvent être utilisées dans un seul dispositif pendant sa durée de vie. Un autre problème concernant les informations est qu'elles n'indiqueront pas nécessairement la probabilité que des sources déterminées aient été retirées du service. Dans certains cas, des licences sont accordées pour permettre au titulaire de posséder jusqu'à un certain niveau d'activité d'un radionucléide donné, un arrangement qui peut présenter des problèmes d'inventaire. Le titulaire de licence peut n'avoir aucune source distincte, ou une ou plusieurs dans les limites de ce niveau d'activité. C'est pour toutes ces raisons qu'un certain suivi peut s'avérer nécessaire.

Même s'il y a un registre national, il est fort probable qu'il sera incomplet. Si tel est le cas, cela signifie que toutes les sources retirées du service n'ont pas été identifiées et que certaines sont devenues des sources orphelines. Par conséquent, il faut examiner le stock existant de manière critique pour vérifier sa qualité, sa rationalité, sa cohérence interne et son exhaustivité probable.

Les problèmes généralement identifiés dans ce domaine sont énumérés ci-dessous :

- seuls certains titulaires de licence ont leur propre inventaire ;
- l'inventaire est seulement local ou régional ;
- seules les sources relevant d'un seul ministère ou département gouvernemental (comme le ministère de la santé) sont incluses ;
- seules les sources d'un certain type ou celles utilisées par une certaine industrie sont incluses ;
- seules les sources acquises ou ajoutées après une certaine date sont incluses ;
- aucune source militaire n'est incluse ;
- il manque des données importantes ;
- certaines données sont manifestement incorrectes ;
- certaines informations sont dépassées.

Différentes approches ont été adoptées dans différents pays pour l'établissement de registres de sources. Dans les pays où le marché des sources est relativement limité et où un seul organisme de réglementation est responsable des sources scellées, il a été possible de conserver une base de données précise comprenant des informations à jour sur toutes les sources. Dans les pays où il y a un grand nombre de sources, une approche régionale a été adoptée. Certains pays qui utilisent depuis longtemps et largement les rayonnements ionisants auront peut-être du mal à passer du système établi à une approche centralisée.

Lors de l'élaboration d'un registre national ou de l'évaluation de l'exhaustivité ou de l'exactitude d'un inventaire, la priorité doit être accordée aux sources des catégories les plus élevées. Par exemple, il devrait y avoir un haut degré d'assurance que toutes les sources des catégories 1 et 2 figurent dans le registre. On peut vérifier l'inclusion des sources des catégories 4 et 5 dans le registre avec un niveau de priorité beaucoup plus faible sur une période plus longue. L'autre aspect de la qualité de l'inventaire concerne le type, l'exactitude et l'exhaustivité des informations enregistrées pour chaque source radioactive.

La plupart du temps, la meilleure méthode pour élaborer et tenir à jour un inventaire des sources radioactives est d'utiliser un logiciel de base de données, plutôt que des tableurs ou des programmes de traitement de texte, comme c'est parfois le cas. Une fois établie, une base de données sur les sources permet d'effectuer beaucoup plus facilement les opérations de recherche, de tri et de création de rapports. Un certain nombre de programmes d'inventaire des matières radioactives disponibles dans le commerce, ainsi que le Système d'information pour les autorités de réglementation (RAIS) de l'AIEA [44] comportent un module d'inventaire des sources.

5.13.3. Exemption

La plupart des États Membres appliquent un certain niveau d'exemption du contrôle réglementaire, basé grosso modo sur les limites d'activité de chaque radionucléide et sur sa radiotoxicité ou des pratiques justifiées. Certains pays associent ces deux approches. Cependant, les pratiques effectives concernant les niveaux d'exemption varient considérablement dans les différents États Membres.

5.13.4. Financement

Une fois que l'équipement acheté et livré, une installation peut ne pas couvrir le coût du transfert de propriété de la source lorsque l'équipement est finalement retiré. Il se peut que ce soit parce que les propriétaires d'installations n'ont pas de mécanisme budgétaire pour comptabiliser un coût qui ne sera réalisé que bien plus tard dans le futur (peut-être des décennies) et dont on ne peut qu'estimer le montant exact. Il est aussi possible que ce soit parce que l'installation présume qu'elle peut couvrir les frais de transfert de propriété sur son budget de fonctionnement ou comme condition d'achat de nouveaux équipements. Cela peut entraîner une pression financière quand arrive le moment du transfert de propriété, avec la tentation correspondante d'utiliser des options moins coûteuses, lesquelles pourraient se traduire par une plus forte probabilité de perte de contrôle de la source usée.

Certain États Membres fournissent des fonds publics, une expertise et des installations pour la récupération, le conditionnement, l'entreposage et le stockage définitif des sources retirées du service et des sources orphelines. Cela est particulièrement efficace pour les sources problématiques à haut risque. Cette approche peut être appliquée avec ou sans frais d'utilisateur.

L'introduction d'une redevance annuelle décourage l'entreposage à long terme des sources retirées du service avec l'imposition d'une sanction pécuniaire. La Finlande applique un tel système.

5.13.5. Gestion des dossiers

Lorsqu'il n'y a pas de dossier sur les premières années d'entreposage concernant l'emplacement d'une source, il est difficile de la récupérer, et notamment d'estimer les doses opérationnelles, d'évaluer la sûreté et d'expliquer les résultats du contrôle radiologique.

Si les producteurs de déchets utilisent un système de traçage de la source, il vaut mieux que celui-ci soit compatible avec le système de traçage des déchets de l'installation d'entreposage. Cela peut réduire le double emploi et/ou permettre le transfert de certaines informations entre les bases de données. L'expérience a montré que l'utilisation de méthodes d'identification couramment employées (par exemple des numéros peints à l'extérieur du tambour ou des étiquettes en papier, même si elles sont plastifiées) ne suffit pas pour garantir l'identification pour un entreposage de longue durée. Les étiquettes doivent

être plus durables, par exemple des étiquettes métalliques fixées sur la matrice de ciment à l'intérieur du conteneur. Une attention particulière doit être apportée à la mise à jour des sauvegardes des bases de données en termes de matériel et de logiciel. La technologie informatique peut changer rapidement au fil du temps. Les retards dans la mise à jour des composants logiciels et matériels peuvent mettre en danger la base de données sources radioactives scellées retirées du service, rendant nécessaire des systèmes redondants. De nombreuses informations ont été perdues dans le passé en raison de la tenue inappropriée de dossiers. Les entrées des registres étaient souvent cryptiques ou ambiguës. D'importants efforts ont été et continuent d'être consacrés à la « traduction » de certains anciens relevés. La tenue d'une base de données de traçage des sources nécessite des efforts continus.

Il est important de vérifier les relevés. On connaît des exemples de cas où ceux-ci ne reflètent pas fidèlement la nature, l'emplacement et les nombres réels des sources. Les bases de données historiques ne disposent pas d'informations suffisantes pour permettre une gestion efficace des déchets entreposés pendant de longues périodes. Le problème rencontré est que la base de données actuelle est opérationnelle et peut ne pas être utilisable à l'avenir dans son état actuel.

Non seulement il est difficile d'établir un système fiable de tenue de registres à long terme, mais parfois rien n'incite à engager des ressources dans cette tâche.

5.13.6. Évaluation du système de gestion

L'adéquation du système de gestion est généralement vérifiée par une évaluation. Celle-ci comprend des activités de la direction sur la vérification des produits, l'auto-évaluation et une vérification indépendante. Elle s'applique à tous les éléments de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service et peut permettre de mesurer leur interface et leur efficacité. Des années d'expérience ont montré qu'un système de gestion laissé à lui-même se dégrade avec le temps. L'évaluation du système de gestion devient donc la partie la plus importante du système général de gestion, car elle fournit une mesure permettant de déterminer l'efficacité de celui-ci avant, pendant et après le stockage définitif, et d'améliorer continuellement la qualité de l'ensemble du processus.

6. STRATÉGIE DE GESTION

Le Code de conduite [14] établit que :

« Chaque État devrait, afin de protéger les personnes, la société et l'environnement, prendre les mesures appropriées nécessaires pour que les sources radioactives qui se trouvent sur son territoire, ou sous sa juridiction ou son contrôle, soient gérées de façon sûre et sécurisée durant leur vie utile et au terme de celle-ci ».

Il n'y a pas de stratégie globale de fin de vie unique applicable à tous les États. Les stratégies de gestion varient en fonction des facteurs suivants : i) la maturité du système législatif et réglementaire ; ii) l'existence d'un programme électronucléaire ; iii) le stock de sources retirées du service dans l'État et les caractéristiques de celles-ci ; iv) les ressources financières et humaines disponibles ; et v) la question de savoir si l'État est un fournisseur de sources radioactives. Les sources retirées du service constitueront probablement l'élément le plus important en ce qui concerne la gestion des déchets radioactifs dans les États sans programme électronucléaire. Pour certains États dotés d'une industrie nucléaire, il peut être difficile de s'assurer qu'une priorité suffisante est accordée à ces sources. Dans de nombreux pays, la politique de gestion des sources radioactives scellées retirées du service est définie dans la politique nationale de gestion des déchets radioactifs. Les questions à aborder au niveau des documents d'orientation sont indiquées à l'article 28 de la Convention commune [13] et dans des publications de l'AIEA [29, 44, 45].

Indépendamment de la taille des activités et de l'importance des risques encourus, chaque État Membre devrait avoir une stratégie de mise en œuvre de sa politique nationale. Cette stratégie devrait définir une approche systématique, y compris des responsabilités clairement attribuées, des connaissances détaillées sur le stock actuel et prévu de sources retirées du service, des séquences bien définies de toutes les étapes de gestion pour chaque source ou une catégorie de sources, et la disponibilité de technologies appropriées. Elle doit être considérée comme un plan de gestion qui facilite la planification systématique et la mise en œuvre sûre de toutes les activités de gestion. Après son approbation par les autorités, ce plan fournira une base en vue de l'octroi de ressources financières pour la gestion des sources retirées du service.

L'élaboration de cette stratégie pourrait relever de la responsabilité d'un titulaire de licence ou de l'organisme central de gestion des déchets radioactifs. Lorsque le nombre de sources est limité et qu'il n'y a pas d'organisme central de gestion des déchets radioactifs, l'organisme de réglementation peut, en coordination avec l'utilisateur, arriver à une solution nationale appropriée pour la gestion des sources radioactives scellées retirées du service.

6.1. CONDITIONS PRÉALABLES À L'ÉLABORATION DE LA STRATÉGIE

Afin d'élaborer ou d'actualiser une stratégie nationale ou la stratégie de l'un des organismes chargés de la mise en œuvre, les personnes concernées doivent, entre autres, connaître les aspects énumérés ci-dessous :

- l'utilisation actuelle et future des sources dans le pays ;
- le stock de sources radioactives scellées retirées du service du pays ;
- le système de catégorisation des sources ;
- les caractéristiques des sources radioactives scellées retirées du service ;
- les stratégies de gestion des sources radioactives scellées retirées du service d'autres pays ;
- les installations de gestion des sources radioactives scellées retirées du service existantes (cellules chaudes, installations d'entreposage et de stockage définitif) ;

- les ressources disponibles (fonds, main-d'œuvre, infrastructure) ;
- le régime réglementaire existant (prescriptions d'acceptation et de retour des sources retirées du service) ;
- les attentes et les intérêts des parties concernées ;
- le système national de classification des déchets radioactifs.

Certains pays peuvent préférer formuler une stratégie à deux niveaux : les principales questions sont prescrites en termes généraux en tant que stratégie nationale par le gouvernement, et sa mise en œuvre détaillée est déléguée à des propriétaires de sources particuliers (stratégies d'entreprise). Cette approche peut être recommandée pour améliorer la coordination de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service, accroître leur sûreté et leur sécurité et permettre la mise en œuvre efficace des ressources nationales. En règle générale, on peut envisager un seul entrepôt/dépôt national au lieu de plusieurs installations appartenant à de grands titulaires de licences ou créer des services centralisés de manutention et de conditionnement.

6.2. OPTIONS DE GESTION STRATÉGIQUE

L'option de gestion choisie pour une source particulière dépendra de divers facteurs pertinents, notamment l'activité, la teneur en radio-isotopes, la période, les termes du contrat d'achat et la condition physique de la source. Après le choix de l'option de gestion, le titulaire de licence informera l'organisme de réglementation de la décision prise. Il devra collaborer avec celui-ci sur toutes les questions liées à la gestion des sources radioactives scellées retirées du service.

Les options générales de gestion suivantes peuvent être envisagées pour les sources radioactives retirées du service :

- transfert à un autre utilisateur autorisé (pour une utilisation future autorisée) ;
- retour au fournisseur/fabricant ;
- entreposage temporaire dans son conteneur blindé d'origine (par exemple pour les radionucléides de période inférieure à 100 jours) ;
- conditionnement (par exemple, suremballage) ;
- entreposage (comme dans une installation d'entreposage dédiée ou centralisée) ;
- stockage définitif.

Toutes les sources entrant dans le processus de gestion des déchets doivent être caractérisées en vue d'établir leur activité, leur teneur en radionucléides et d'autres caractéristiques importantes. Des options de gestion particulières pourraient être déterminées sur la base de ces caractéristiques. La figure 44 donne un aperçu des options de gestion d'une source radioactive scellée retirée du service, en tenant compte de la possibilité de réutilisation/recyclage de la source et de diverses options de stockage définitif, en fonction des caractéristiques de la source, y compris sa période et sa condition physique.

Le déclassement se rapporte à l'enlèvement des sources de rayonnement autorisées et des dispositifs connexes d'une installation et aux mesures administratives et techniques mises en œuvre pour lever certains ou tous les contrôles réglementaires [30]. Certaines installations peuvent n'avoir qu'un seul dispositif à rayonnement, comme un dispositif de téléthérapie. D'autres peuvent avoir des locaux agréés dans lesquels de nombreux dispositifs individuels sont installés (comme une ligne de production équipée de jauges industrielles) ou entreposés (comme un entrepôt pour dispositifs mobiles). Le déclassement peut mettre en jeu l'enlèvement d'un grand nombre de sources avant la résiliation de la licence d'une installation, ou encore d'une partie du parc de dispositifs d'une installation avant la délivrance d'une nouvelle licence et l'installation de dispositif de remplacement pour les travaux futurs. Le remplacement d'une source logée dans un dispositif existant n'est pas considéré comme une activité de déclassement. Les orientations relatives à la gestion sûre des activités de déclassement des installations médicales,

industrielles et de recherche [46] devraient être suivies lors de la planification et de l'exécution du déclassé.

En ce qui concerne les installations utilisant des sources radioactives scellées, le déclassé peut mettre en jeu uniquement l'enlèvement autorisé de toutes les sources de l'installation. Dans les situations plus complexes où des équipements renfermant des sources doivent être démantelés sur site, les activités de déclassé devraient être effectuées par un personnel dûment qualifié et expérimenté, dans des zones adaptées aux types de procédure à entreprendre. De nombreux utilisateurs d'équipements contenant des sources n'auront ni le personnel ni l'autorisation nécessaires pour le démontage complet d'un équipement supposant l'enlèvement de la source scellée.

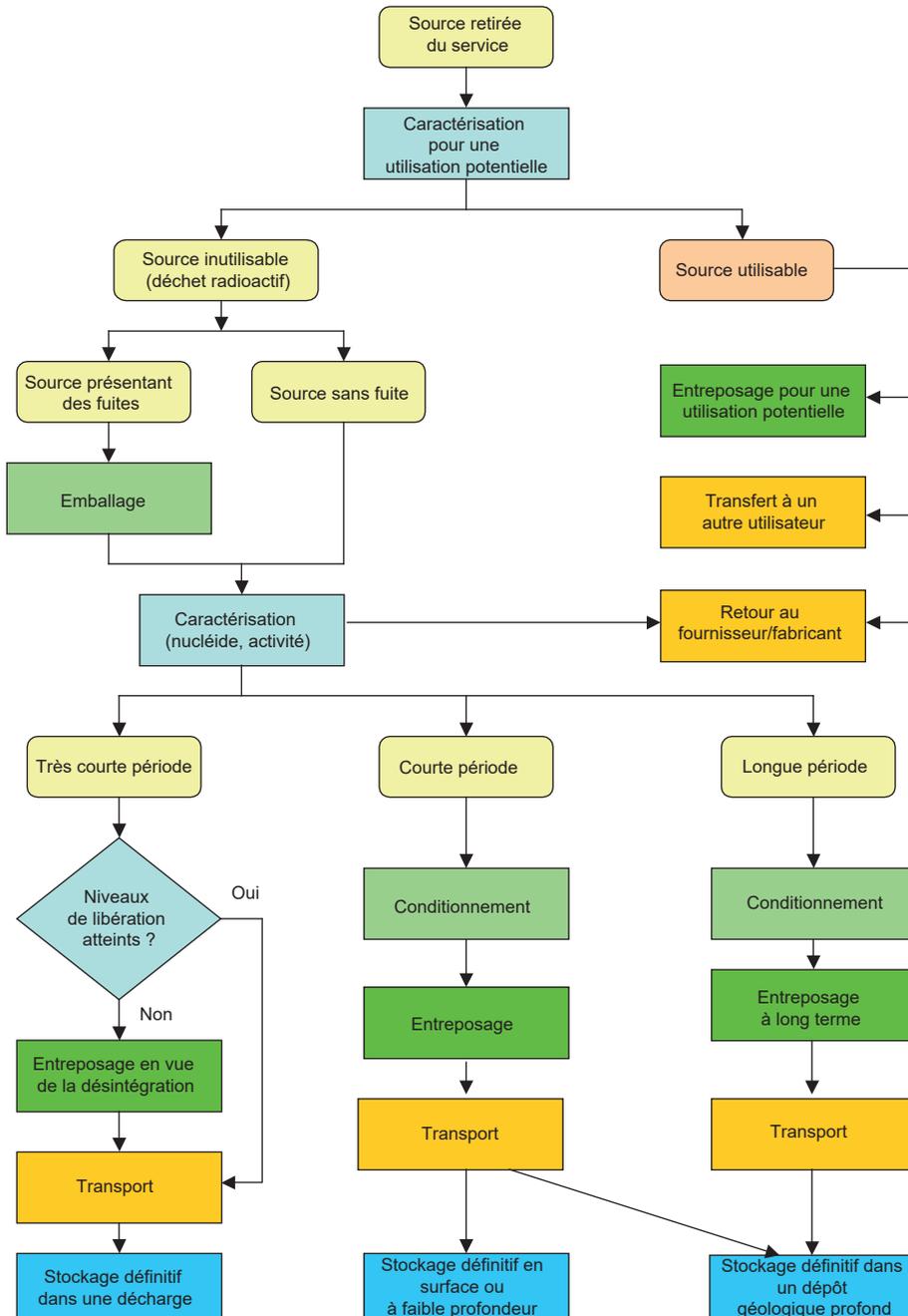


FIG. 44. Schéma de gestion d'une source radioactive scellée retirée du service.

6.2.1. Transfert à un autre utilisateur autorisé

Si l'activité et la condition physique d'une source radioactive scellée retirée du service permettent de l'utiliser encore, celle-ci peut être réutilisée dans d'autres applications. Le transfert de sources à d'autres utilisateurs présente des avantages à la fois économiques et environnementaux. Toutefois, il devrait se faire de manière contrôlée et le destinataire de la source devrait être informé des prescriptions réglementaires applicables. Dans le cadre de cet arrangement, il faut s'assurer que le site de l'utilisateur est autorisé à recevoir la source, que l'infrastructure requise pour accueillir la source à réutiliser dans l'installation du nouvel utilisateur est disponible et que les documents pertinents sont également échangés entre l'ancien et le nouvel utilisateur ainsi qu'avec l'organisme de réglementation nationale. La réutilisation des sources scellées peut être envisagée avant leur achat, si les circonstances le permettent.

Il faudra veiller tout particulièrement à ce qu'elles soient utilisables et conviennent à la nouvelle application envisagée. Des copies de toutes les informations pertinentes sur l'historique d'utilisation de la source (telles que les conditions d'utilisation et les relevés de maintenance) doivent être fournies au nouveau propriétaire. Au minimum, ces renseignements devraient inclure le numéro de série de la source, la teneur en radionucléide et l'activité. Pour les sources de haute activité, il est probable que les contrôles de service pertinents ne pourront être effectués que dans une installation spécialisée. Leur transfert direct entre utilisateurs pourrait donc ne pas être approprié et la cession devrait se faire par l'intermédiaire d'un fabricant, d'un fournisseur de sources ou d'un autre organisme compétent.

Le transfert entre utilisateurs à l'intérieur des frontières nationales est particulièrement indiqué pour les sources au ^{137}Cs et au ^{60}Co utilisés en thérapie clinique. On peut réutiliser une source dans le porte-source d'origine sans démonter la capsule. De préférence, les sources scellées fournies à d'autres utilisateurs sont emballées et expédiées dans le conteneur d'expédition d'origine. Si celui-ci n'est pas disponible, des dispositions appropriées doivent être prises en vue d'acquiescer un conteneur approprié ou de recourir aux services d'un organisme spécialisé dans le transport de produits nucléaires.

6.2.2. Retour au fournisseur/fabricant

Lorsque la réutilisation n'est pas possible, la source radioactive scellée retirée du service peut être retournée au fournisseur/fabricant d'origine ou à un autre fournisseur/fabricant. Étant donné que les fabricants et/ou les fournisseurs connaissent les aspects économiques du recyclage et de la demande de sources de divers types, ils sont dans une position idéale pour prendre les décisions appropriées concernant la destinée finale des sources. Les procédures de retour peuvent comprendre les dispositions juridiques suivantes :

- l'utilisateur d'une source radioactive scellée inclut une clause dans le contrat d'achat ou de location permettant ou exigeant le retour de la source ; cela est devenu une pratique courante dans de nombreux pays ;
- une copie du contrat contenant la clause de retour est soumise à l'organisme de réglementation avant l'importation d'une source.

Si des arrangements pour le retour d'une source n'ont pas été convenus avec un fournisseur et/ou un fabricant au moment de l'achat, ils peuvent être conclus à tout moment au cours du cycle de vie de la source. Les sources retournées aux fournisseurs/fabricants doivent être emballées et transportées conformément au règlement de transport applicable [47]. Parfois, le retour n'est pas possible, en particulier pour les sources anciennes dont le fournisseur est inconnu ou n'est plus en activité.

Le retour au fournisseur et/ou au fabricant d'origine est souvent le choix préféré pour les sources des catégories 1 et 2 ; toutefois, il faut essayer de retourner toutes les sources radioactives scellées retirées du service au fournisseur et/ou fabricant, lesquels doivent disposer de tout l'équipement nécessaire pour la réutilisation/le recyclage.

Les sources radioactives scellées retirées du service dont l'activité est relativement élevée sont généralement réencapsulées et recyclées dans des cellules chaudes. Les sources au ^{60}Co , au ^{137}Cs et les sources neutroniques à l'Am-Be sont généralement réencapsulées. La matière brute retirée des capsules peut être utilisée pour produire de nouvelles sources à d'autres fins. Par exemple, les sources au ^{137}Cs sous forme de chlorure de césium provenant d'anciens dispositifs de téléthérapie peuvent être récupérées et transformées en petites sources pour d'autres applications, telles que la curiethérapie.

Les sources de neutrons comme le ^{252}Cf sont aussi recyclées. Les sources contenant moins de 40 mg de ^{252}Cf pourraient être acceptées pour un stockage définitif à faible coût, tandis que celles dont l'activité est plus élevée pourraient être recyclées et utilisées pour fabriquer de nouvelles sources.

La plupart des isotopes ne se prêtent généralement pas à la ré-irradiation. Une exception notable est le ^{75}Se , qui est obtenu par irradiation, soit de Se naturel, soit de ^{74}Se hautement enrichi, une matière brute très coûteuse. On peut irradier les sources au ^{75}Se usées à plusieurs reprises pour obtenir de nouvelles sources avec les mêmes performances qu'auparavant.

La location, plutôt que l'achat, des sources est en train de devenir une option de plus en plus courante. Dans le cadre d'un tel arrangement, l'utilisateur n'est jamais propriétaire de la source, mais la loue chez le fournisseur pour une période spécifiée après laquelle elle est retournée au fournisseur/fabricant. À certains égards, la location améliore la sûreté des sources, car le fabricant en conserve la propriété et, avec elle, la responsabilité de la récupérer pour stockage définitif. Toutefois, la partie principale continue d'assumer la responsabilité de la sûreté au jour le jour. La location des sources peut être une option offerte aux utilisateurs pour une courte durée, ou pour des sources de faible activité ou de courte période.

6.2.3. Entreposage avant stockage définitif

Les sources peuvent être soit entreposées avant le stockage définitif en particulier pour permettre la désintégration radioactive des radionucléides à courte période (*entreposage à court terme*), ce qui simplifie les dispositions de ce stockage, soit entreposées pendant que les dispositions de stockage définitif sont en cours. Cependant, l'entreposage prolongé de sources retirées du service pour des raisons autres que la désintégration radioactive n'est pas encouragé. La meilleure façon de gérer la période d'entreposage en attendant le déclassement et le stockage définitifs doit être choisie par la partie principale, avec l'approbation de l'organisme de réglementation, en tenant compte des circonstances particulières de l'installation. Par exemple, si celle-ci contient beaucoup de sources sur une chaîne de production désaffectée, il faudrait envisager de rassembler celles-ci en lieu sûr. En tout état de cause, une telle mesure s'impose si le contrôle des sources ne peut être garanti dans les locaux désaffectés.

Les sources radioactives scellées retirées du service contenant des radio-isotopes à courte période (par exemple ^{32}P , ^{125}I , ^{192}Ir , ^{210}Po) peuvent être entreposées pendant des périodes appropriées pour une désintégration radioactive à des niveaux acceptables pour lever le contrôle réglementaire des matières radioactives. Le stockage définitif, dans les installations de déchets municipaux ou d'autres décharges de déchets non radioactifs, des sources inactives retirées du service comme matières non radioactives, doit être évité tant qu'il n'est pas confirmé que l'activité résiduelle qui sera rejetée dans l'environnement est compatible avec les niveaux de libération établis par l'organisme de réglementation.

Lors de l'établissement des niveaux de libération, ou simplement pour libérer les sources retirées du service d'un contrôle réglementaire supplémentaire « au cas par cas », cet organisme doit tenir compte des niveaux d'exemption établis dans la législation nationale en matière de radioprotection. Comme recommandé dans les NFI [11], le niveau de libération pour un nucléide particulier ne devrait pas être supérieur au niveau d'exemption pour ce nucléide. En ce qui concerne les radionucléides appropriés pour l'option d'entreposage en vue de la désintégration radioactive, quelques exemples et leurs niveaux d'exemption sont recommandés dans les NFI.

Seules les sources répondant aux exigences d'entreposage définies peuvent être acceptées pour l'entreposage sur site ou dans une installation d'entreposage centralisée (voir la section 9). Pour répondre à ces exigences, la source doit passer par un conditionnement qui la rend apte à un entreposage sûr et sécurisé. Ce conditionnement devrait prendre en compte le potentiel de récupération de la source pour

un recyclage/une réutilisation ultérieurs, ou en vue d'un reconditionnement pour stockage définitif (voir les sections 10 et 12). Par exemple, conditionner une source en l'enfouissant dans du béton peut être contreproductif s'il faut ensuite la récupérer, la recycler ou la réutiliser, ou encore la réemballer pour stockage définitif.

La plupart des pays ne disposent pas d'installation de stockage définitif appropriée pour les sources radioactives scellées retirées du service. L'établissement de ce type d'installation demandera probablement beaucoup de temps. Il faut donc des installations d'*entreposage à long terme*. Elles pourraient être exploitées au niveau national ou régional et nécessiter une supervision réglementaire appropriée.

6.2.4. Stockage définitif

S'il n'y a pas d'option de recyclage/réutilisation ou de retour au fournisseur/fabricant et qu'un dépôt approprié est disponible, alors l'utilisateur doit envisager le stockage définitif de la source comme déchet radioactif conformément aux prescriptions applicables. Le stockage définitif est la phase ultime du cycle de vie des sources radioactives.

Les options de stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service varient en fonction des niveaux d'activité et des types de radionucléides qu'elles contiennent [48]. Les dépôts en surface ou à faible profondeur peuvent convenir aux sources de faible activité, de courte période. Toutefois, les caractéristiques radiologiques particulières de nombreuses sources radioactives scellées retirées du service ne sont pas compatibles avec les critères d'acceptation des déchets établis pour ces installations. Le problème à cet égard est dû au fait que ces sources constituent des concentrations localisées élevées, ou « points chauds », dans l'installation et pourraient entraîner des doses de rayonnement inacceptables en cas d'intrusion humaine par inadvertance. Pour les sources retirées du service à longue période dont les niveaux d'activité dépassent ceux des critères de stockage définitif des dépôts en surface ou à faible profondeur, le stockage définitif souterrain en profondeur est l'option privilégiée. Le stockage définitif en formations géologiques profondes offre le niveau le plus élevé de confinement disponible parmi les concepts de stockage définitif actuellement à l'étude. Pour les pays sans perspective de tels dépôts, la mise en place éventuelle de dépôts géologiques multinationaux dans le futur serait intéressante. Une autre possibilité est l'établissement, sur le territoire national, d'un type spécial d'installation de stockage en puits destiné spécialement au stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service [48].

Il faut effectuer une analyse de sûreté pour toute option de stockage définitif et obtenir une licence pour une telle utilisation, avant la mise en œuvre de cette option.

6.3. TYPE D'INSTALLATION

Outre les options générales de gestion décrites ci-dessus, il existe certaines approches techniques que les pays peuvent envisager pour la gestion de leurs sources radioactives scellées retirées du service. Ces approches comprennent le partage d'installations, la centralisation des installations et l'utilisation d'installations de traitement mobiles.

6.3.1. Installations partagées

Les pays peuvent envisager de partager des installations dédiées de gestion des déchets radioactifs avec d'autres pays. Cette approche a l'avantage de réduire le coût de la gestion des sources radioactives scellées retirées du service pour tous les pays concernés.

Les installations partagées pourraient inclure des installations multilatérales d'entreposage et de stockage définitif. De telles propositions ont été avancées dans le cadre de la Convention commune [13] et il y a eu des discussions entre des pays intéressés [49].

6.3.2. Installations centralisées

Un choix stratégique peut être opéré entre des installations centralisées et des installations de gestion des sources radioactives scellées retirées du service propres au site. Chacune de ces approches a ses mérites. Une installation centralisée possédant les capacités de traitement, d'entreposage et, éventuellement, de stockage définitif de la totalité ou d'une bonne partie des sources radioactives scellées retirées du service dans un pays est généralement plus économique que l'approche de sites séparés, nécessite moins de personnel que plusieurs sites séparés et est susceptible d'assurer une meilleure sécurité. Cela dit, la gestion de la source sur le site où elle a été retirée du service présente l'avantage de réduire les besoins de transport de la source.

En fait, le choix est rarement opéré sur des bases purement économiques, car il y a généralement des facteurs politiques locaux, des aspects historiques du développement nucléaire national, des facteurs géographiques et des aspects de l'opinion publique à prendre en compte. Néanmoins, lors de l'élaboration ou de la mise à niveau d'une stratégie, la possibilité de choisir entre ces options devrait être dûment prise en considération pour toutes les activités, ou des parties de ces activités, de gestion des déchets dans le pays.

6.3.3. Installations mobiles

Une autre solution possible, partielle, pour les installations centralisées de gestion des sources radioactives scellées retirées du service, qui présente de nombreux avantages économiques identiques, est l'utilisation d'installations de traitement mobiles. Celles-ci sont exploitées en mode « par lots », car il faut généralement une certaine quantité minimum de sources pour qu'elles fonctionnent efficacement. Les coûts de gestion des sources radioactives scellées retirées du service pour chacun des utilisateurs peuvent être réduits si ces systèmes de traitement sont partagés. Un exemple d'installation mobile utilisée pour le conditionnement de sources de haute activité est l'installation de cellules chaudes mobiles de l'AIEA (voir la section 10.7).

6.4. ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE GESTION

Les stratégies de gestion des sources radioactives scellées retirées du service devraient être compatibles avec la situation particulière de l'État Membre et y répondre. Une stratégie nationale de gestion de ces sources peut comporter trois phases [50] :

- 1) *Évaluation* : définir le champ d'application de la stratégie.
- 2) *Élaboration* : déterminer et hiérarchiser les mesures de solutions et élaborer un plan d'intervention en conséquence.
- 3) *Mise en œuvre* : obtenir les engagements et les ressources nécessaires, mettre en œuvre les solutions, enfin évaluer l'impact du plan.

Lors de l'élaboration d'une stratégie globale, l'État Membre devra évaluer les avantages et les inconvénients des différentes options et se prononcer sur leurs priorités. D'une manière générale, une stratégie nationale pourrait être basée sur :

- les catégories de sources (par exemple catégories 1, 2 et 3) ;
- le type de source (par exemple sources de radiographie industrielle) ;
- le secteur industriel où des problèmes ont été déterminés (par exemple recyclage de la ferraille) ;
- la région ou la zone géographique (par exemple la capitale) ;
- les sources utilisées avant la mise en place d'un organisme de réglementation.

Une évaluation réaliste des ressources disponibles tant pour l'élaboration que pour la mise en œuvre de la stratégie nationale est essentielle pour l'efficacité du processus. Certains pays peuvent être en mesure de consacrer des efforts importants à l'élaboration d'une stratégie nationale exhaustive qui anticipe les conditions futures et propose des actions adaptées à ces conditions.

La phase d'évaluation de l'établissement d'une stratégie nationale de gestion des sources radioactives scellées retirées du service met en jeu le recueil d'informations puis leur évaluation afin de tirer des conclusions sur la nature et l'ampleur du problème. Elle sera un processus soutenu et continu au fur et à mesure que la situation d'un État Membre évolue. La phase d'évaluation de ce processus ne sera pas le seul point de décision, mais plutôt celui où sont prises des décisions majeures sur la nécessité, l'orientation et le contenu de la stratégie nationale.

Les informations seront évaluées pendant et après leur collecte. Le volume et le type d'informations recueillies pourraient permettre de déterminer s'il faut ou non modifier la portée et la méthodologie de l'évaluation. Lorsque des informations appropriées sont obtenues, les conditions réelles peuvent être comparées aux lois et réglementations nationales pertinentes, ainsi qu'aux normes et orientations internationales [28, 51], afin de déterminer l'existence et l'étendue des écarts par rapport à la stratégie nationale de gestion des déchets. Le Code de conduite [14] est utile en tant que document d'orientation international sur cette question.

6.5. PROBLÈMES RENCONTRÉS ET ENSEIGNEMENTS TIRÉS

6.5.1. Questions d'ordre général

Le pays où a été utilisée une source est susceptible d'en avoir tiré le maximum d'avantages pratiques et commerciaux et on peut soutenir qu'il devrait assumer la responsabilité de son stockage définitif si une voie pertinente appropriée existe ou est prévue. Toutefois, il convient de tenir dûment compte des avantages économiques de la collecte d'un grand nombre de sources d'un type similaire à des fins de recyclage ou de stockage définitif dans une seule installation. Il peut très bien y avoir une telle installation dans le pays de fabrication, mais ce ne sera pas nécessairement le cas.

Parfois, les contrôles réglementaires en place (inspection, application, etc.) sont inefficaces. Dans ces cas, il faut établir un système d'inspection pour faire appliquer les dispositions introduites conformément aux règlements pertinents. Ceux-ci devraient habiliter les autorités à appliquer des sanctions en cas de violation de leurs dispositions. Ces sanctions peuvent être des amendes proportionnelles, la suspension ou le retrait de la licence. Les dispositions générales du code pénal devraient également s'appliquer.

6.5.2. Transfert à un autre utilisateur autorisé

Il ressort de l'expérience acquise dans les cas d'accidents réels mettant en jeu des sources retirées du service que le risque d'accidents augmente lorsque l'on transfère physiquement des sources à un autre utilisateur sans lui transférer les informations et les responsabilités connexes.

Lors d'un changement de responsabilité, soit au sein d'un même établissement (de l'ancien opérateur au responsable d'un entreposage temporaire) soit entre un établissement (ancien propriétaire) et un autre (nouveau propriétaire), tout déficit d'information entre les deux utilisateurs ou établissements est une source potentielle de nouveaux risques.

6.5.3. Retour au fournisseur/fabricant

Les organismes de réglementation de nombreux États Membres encouragent ou exigent le retour des sources au fournisseur/fabricant. Cependant, cette option peut être difficile à mettre en œuvre dans certains cas, pour les raisons suivantes :

- le fournisseur d'origine est inconnu, n'existe plus ou est introuvable ;
- les certificats de source ou les certificats de forme spéciale ont expiré ;
- il n'y a pas de conteneur de transport approprié ;
- les moyens de transport adéquats font défaut ;
- les fonds nécessaires pour l'emballage et le transport des sources radioactives scellées retirées du service font défaut ;
- le système de réglementation impose certaines restrictions d'importation/exportation.

Ces obstacles contribuent à créer une certaine confusion chez les parties concernées, notamment en raison des restrictions et des difficultés liées à l'expédition transfrontière de sources radioactives scellées retirées du service. Compte tenu des restrictions relatives au transfert des déchets radioactifs entre pays, il y a eu plusieurs cas particuliers (des deux côtés, à savoir l'expéditeur et le destinataire) où des sources retirées du service ont été transférées de leur utilisateur à une partie qui les a acceptées pour, au moins, une réutilisation partielle. Dans ces cas, il semble que ce soit une pratique courante que le destinataire accepte l'expédition (contenant plusieurs sources) et déclare les sources inutiles comme déchets, peu de temps après avoir reçu l'expédition. Cependant, des problèmes de sécurité concernant les sources radioactives scellées retirées du service ont motivé le retour de ces sources aux fournisseurs. L'aspect clé qui pourrait permettre de résoudre ces questions pourrait être que les fabricants et les organismes de réglementation considèrent plutôt la durée de vie recommandée comme un élément important dans le processus de prise de décisions sur le statut d'une source retirée du service. La situation pourrait être améliorée par l'adoption d'une politique commune qui devrait tenir compte des points énumérés ci-dessous.

6.5.4. Entreposage avant stockage définitif

Il est établi qu'un grand nombre de sources retirées du service sont entreposées dans les locaux des utilisateurs dans tous les États Membres. Certaines d'entre elles appartiennent en fait à des cliniques privées et par conséquent, la propriété est une question importante pour déclarer ces sources comme déchets radioactifs. Bien souvent, l'entreposage des sources dans les locaux des utilisateurs s'explique principalement par des raisons économiques. Ces sources peuvent être conservées pendant des décennies dans des conteneurs dont certains peuvent être en mauvais état. Dans certains cas, le coût élevé associé au stockage définitif, ou l'absence d'options appropriées d'un tel stockage, peuvent être des facteurs dissuasifs pour le stockage définitif sûr des sources, et obliger ainsi à entreposer celles-ci, souvent pour une période indéterminée. Étant donné que les sources sont entreposées et ne sont pas utilisées, la responsabilité de ces sources peut être perdue au fil du temps, ou elles peuvent être enlevées sans autorisation ou volées.

Le Code de conduite [14] prévoit que chaque État devrait veiller à ce que les sources scellées ne soient pas entreposées pendant de longues périodes de temps dans des installations qui n'ont pas été conçues pour un tel entreposage. L'entreposage centralisé des sources retirées du service réduit la probabilité de perte, en particulier lorsqu'il y a un contrôle réglementaire générique. Certes, de nombreux États Membres exploitent des entrepôts centralisés provisoires capables d'accueillir la plupart des sources, mais il y a parfois des limites quant aux types de sources qui peuvent être facilement manipulées et entreposées. La capacité d'entreposage devient parfois aussi un problème après quelques années.

Les facteurs techniques et non techniques dont dépend le choix de la technologie de conditionnement des déchets sont analysés dans la référence [52]. Ils sont partiellement applicables pour des sources radioactives scellées retirées du service si elles sont considérées comme des déchets radioactifs et doivent être pris en compte lors de l'élaboration d'une stratégie de gestion des déchets.

6.5.5. Stockage définitif

Alors que certains États Membres possèdent ou prévoient de mettre en place des installations de stockage définitif des déchets radioactifs, il n'en est rien pour d'autres et, dans certains cas, le nombre

limité de sources et le faible volume d'autres déchets radioactifs peuvent ne pas justifier la mise en place d'une installation de stockage définitif, en particulier pour les sources de haute activité ou à longue période.

Les petits pays sans infrastructure nucléaire ne devraient pas être tenus d'élaborer une solution de stockage définitif de sources et devraient être autorisés à utiliser celles d'autres États Membres. L'idéal serait que ce soit le pays de fabrication de la source, mais cela n'est nullement nécessaire s'il y a une autre possibilité pratique.

7. CARACTÉRISATION DES SOURCES RETIRÉES DU SERVICE

L'AIEA définit la caractérisation dans la référence [1] comme la « détermination des propriétés physiques, chimiques et radiologiques des déchets en vue d'établir s'ils doivent faire l'objet d'un ajustement, d'un traitement ou d'un conditionnement ou s'ils peuvent être manutentionnés, transformés, entreposés ou stockés définitivement ». La connaissance des quantités et des caractéristiques des sources retirées du service est essentielle pour le choix d'une option de gestion et la démonstration de la sûreté des méthodes de gestion.

7.1. INFORMATIONS REQUISES

Il faut caractériser chaque source retirée du service avant d'entreprendre les étapes de gestion. Au minimum, les informations suivantes sont requises :

- l'identification des nucléides ;
- l'estimation de l'activité ;
- les propriétés physiques de la source et/ou du dispositif, y compris le poids et les dimensions ;
- la forme chimique ;
- le type de blindage ;
- l'état de la source (par exemple si elle est endommagée/si elle fuit/si elle a été modifiée).

L'acquisition de ces données est considérée comme l'exigence minimale absolue pour la manutention, le conditionnement, le transport, l'entreposage et le stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service. Outre les données ci-dessus, les informations suivantes seront utiles en vue de l'élaboration d'une stratégie de gestion pour une source particulière :

- la méthode de scellage de la matière radioactive ;
- le numéro de la source et du dispositif ;
- la date de fabrication ;
- le nom du fabricant et le pays d'origine (pour la source et du dispositif) ;
- le dernier utilisateur ou propriétaire ;
- l'emplacement actuel ;
- toute information pouvant aider à caractériser la source.

7.2. GROUPES DE CARACTÉRISATION DES SOURCES RETIRÉES DU SERVICE

Une caractérisation préliminaire des sources peut s'avérer nécessaire pour permettre de les séparer en types gérables. Par exemple, on séparera les sources radioactives scellées des autres déchets, les sources de faible activité de celles contenant des radionucléides à courte période et on enlèvera les sources radioactives scellées de leur matrice d'encapsulation en ciment. Les sources qui fuient doivent être séparées des autres et collectées séparément pour éviter la contamination croisée. Il se peut que l'on puisse séparer dans un premier temps les déchets en fonction de l'historique de l'installation, des données existantes sur les déchets et des mesures disponibles. Ainsi, en fonction de l'exhaustivité et de la solidité des données disponibles, il se peut que l'on ne puisse mettre en œuvre qu'un programme simplifié de caractérisation pour la vérification et la validation.

Du point de vue de la caractérisation, les sources radioactives scellées retirées du service appartiennent aux groupes suivants :

a) *Sources contrôlées (documentées)* : par définition, un dispositif, une source ou un colis de transport radioactif sont dits « contrôlés » lorsqu'ils sont utilisés aux fins prévues et ont un propriétaire identifiable. Si ces exigences ne sont pas remplies, on peut considérer le dispositif, la source ou le colis de transport comme « non contrôlés ». Les sources contrôlées disposent d'une documentation appropriée qui fournit objectivement des informations sur leurs caractéristiques. Celle-ci comprendrait généralement :

- le document du fabricant (certificat) ;
- le marquage permanent sur la source ou sur l'équipement/la jauge ;
- le certificat de traçabilité ;
- les données d'analyse non destructive ;
- le document relatif au stock.

Toute cette documentation peut être utilisée tant qu'elle permet de remonter aux sources en question et de vérifier leurs activités. En ce qui concerne le document relatif au suivi des stocks, les activités doivent être vérifiées.

- b) *Sources non contrôlées (non documentées)* : Ce sont des sources dépourvues de documents appropriés concernant leurs caractéristiques. Pour les sources de ce groupe, il faudra déployer des efforts supplémentaires pour identifier les isotopes et déterminer les activités associées. Les sources orphelines appartiennent la plupart du temps au groupe des sources non documentées, c'est-à-dire que des actions similaires doivent être entreprises pour les caractériser. Outre le processus de caractérisation, il est important de trouver l'ancien propriétaire de la source. Cela peut aider à suivre l'itinéraire de la source orpheline du dernier (précédent) propriétaire jusqu'au statut de source perdue et à déterminer si une seule source a été perdue ou si d'autres doivent aussi faire l'objet de recherches et d'un suivi.
- c) *Source présentant des fuites* : ce sont des sources dont la barrière de confinement n'empêche plus la dispersion de la matière radioactive. Le groupe des sources scellées peut comprendre des sources ayant une documentation appropriée (sources contrôlées) et des sources sans documentation appropriée (sources non contrôlées). Les sources présentant des fuites sont caractérisées à part, car elles peuvent nécessiter une encapsulation et/ou d'autres options de conditionnement supplémentaires.

7.3. IDENTIFICATION DES SOURCES

La meilleure méthode d'identification est le numéro de série s'il est marqué et est lisible. L'inspection visuelle est une technique très utile pour déterminer certains paramètres, ce qui aidera à caractériser les sources radioactives scellées [53]. Ces paramètres comprennent des informations sur l'état physique de la source, ses dimensions et son blindage/boîtier.

On peut examiner les miroirs, les loupes, les jumelles, les caméras vidéo télécommandées et autres pour les inspections visuelles et cet examen est fortement recommandé pour obtenir des informations initiales sous réserve du respect du principe ALARA (aussi bas que raisonnablement possible). Les endoscopes peuvent être utilisés pour inspecter visuellement les sources et les conteneurs à distance. Par exemple, cette inspection pourrait servir à détecter les marques/étiquettes des sources radioactives scellées, ou les preuves de corrosion et d'humidité à l'intérieur du système de confinement des déchets.

L'identification des sources est facilitée par la reconnaissance des blindages et des équipements associés. Dans de nombreux cas, les dispositifs et les emballages de transport sont également étiquetés. En fonction du blindage du colis, les étiquettes des catégories ne donnent pas d'indication sur la quantité de matière radioactive, le type de rayonnement ou la dangerosité de la matière. Cependant, le nucléide, le nombre de masse et l'activité doivent figurer sur l'étiquette. Il ne faut pas confondre les « catégories » dont il est question dans le contexte de l'étiquetage des colis avec celles du système de catégorisation de

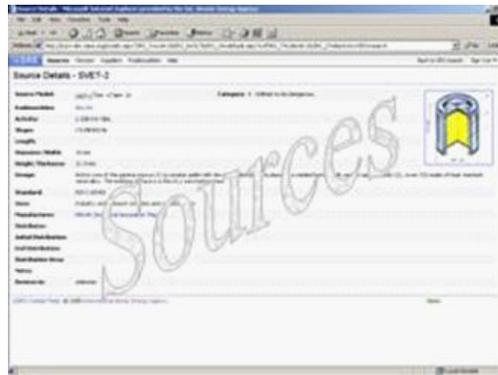
l'AIEA, qui classe les sources radioactives en fonction du niveau de danger. Les formes et les dimensions des sources varient considérablement en fonction de leurs objectifs ; cependant, la conception particulière des dispositifs ou des boîtiers contenant des sources radioactives peut être utile à la reconnaissance visuelle de ces sources. Les données collectées dans le passé sur les structures courantes d'encapsulation et de rétention des sources radioactives scellées pourraient donner une indication des radionucléides qu'elles pourraient contenir et de l'activité approximative de leur contenu.

L'AIEA a élaboré un système exhaustif de données sur les sources radioactives scellées. Celui-ci comprend des données sur les sources radioactives scellées réelles, ainsi que sur les dispositifs dans lesquels elles sont logées. Ce système, qui se présente sous la forme d'une base de données informatique, est appelé Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes [54].

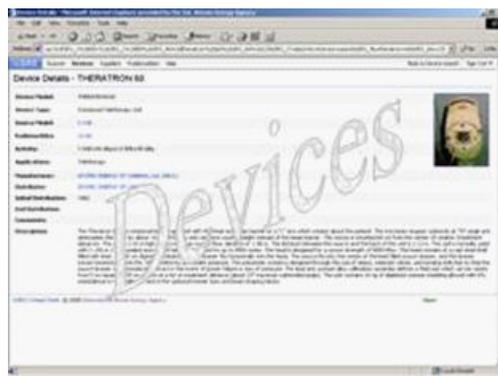
Ce catalogue fournit des informations essentielles sur diverses personnes et organisations liées aux sources et aux dispositifs radioactifs de fabrication industrielle, appelés « modèles de source » et « modèles de dispositifs ». Il facilite l'identification des sources, sur la base des informations limitées disponibles (ou « trouvées ») pour des sources ou des dispositifs radioactifs donnés, et contribue ainsi à la manutention sûre des sources.

Ce catalogue utilise un énorme volume de données pour fournir des renseignements sur une source ou un dispositif inconnus donnés pour lesquels les données disponibles sont très fragmentaires. Ces renseignements sont gérés à travers trois principales bases de données liées.

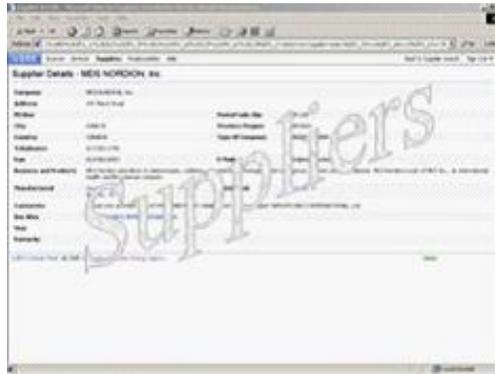
- Modèles de sources : cette base de données contient des données sur les modèles de sources (c'est-à-dire les radionucléides, l'activité, la catégorie, la forme, la taille, les détails de fabrication, les utilisations, le fabricant/distributeur, etc.). Le catalogue contient actuellement 6 800 modèles de sources.



- Modèles de dispositifs : la base de données contient des données sur les modèles de dispositifs, y compris les conteneurs de transport (c'est-à-dire description, applications, fabricant/distributeur et identification des sources scellées autorisées à l'intérieur du dispositif). Le catalogue contient actuellement 8 000 modèles de dispositifs.



- Fournisseurs : cette base de données contient les adresses des fabricants et des distributeurs de sources radioactives scellées et des dispositifs dans lesquels elles sont logées. Le catalogue contient actuellement des informations sur 1 200 fabricants/distributeurs.



Ses options comprennent un système d'identification (navigateur) dans lequel le demandeur remplit un formulaire qui s'affiche sur l'écran. Lorsque le formulaire est rempli, le catalogue donne le nom de la source ou du dispositif le plus probable.

Le groupe cible pour l'utilisation du catalogue est très varié et comprend les organismes de réglementation, les professionnels qui s'occupent des sources orphelines, les fabricants, les distributeurs, les équipes d'intervention d'urgence, les utilisateurs des sources/dispositifs, les organismes chargés de l'application de la loi, les autorités douanières, les dépôts de ferraille et les usines métallurgiques ainsi que les entreprises et organismes de gestion des déchets.

Pour faire du catalogue un outil utile pour les États Membres, l'AIEA prévoit de le maintenir et de l'actualiser régulièrement, en mettant un accent particulier sur l'AQ/le CQ et les essais des dispositifs lorsqu'ils sont incorporés.

7.4. CARACTÉRISATION DES SOURCES NON DOCUMENTÉES

Lorsque les informations susmentionnées ne sont pas disponibles, elles devraient être obtenues par différentes méthodes de caractérisation. Il est recommandé qu'un système de caractérisation soit mis en place et opéré selon un système de gestion adéquat. Ce système devrait garantir le respect des prescriptions environnementales, techniques et de sûreté.

7.4.1. Prescriptions du système de caractérisation

Avant d'établir un système de caractérisation des sources radioactives scellées, il faudrait fournir une spécification qui déterminera les prescriptions de ce système [55, 56]. Il peut s'agir d'une spécification détaillée pour un équipement particulier si l'opérateur est convaincu que cet équipement est nécessaire. À défaut, il peut s'agir d'une spécification fonctionnelle qui décrit le problème (y compris les tâches à effectuer et les résultats requis) et permet au fournisseur d'user de son jugement professionnel sur le choix du système. Cela peut, par exemple, permettre au fournisseur de proposer des systèmes intégrés ou uniques, en fonction du problème.

Les renseignements suivants doivent être fournis :

- a) des informations détaillées sur les sources radioactives scellées retirées du service, notamment leur histoire, leur âge, les radionucléides attendus et la forme physique des sources, la matrice des déchets, notamment les matériaux (par exemple absorbeurs de neutrons), qui peuvent influencer sur les techniques de mesure, les dimensions des emballages ;

- b) des données détaillées sur le processus global, y compris une description de l'installation qui accueillera le(s) système(s) de caractérisation, l'environnement de travail de l'équipement, les contraintes relatives aux dimensions de celui-ci, les prescriptions de débit, le temps maximum disponible pour les mesures ;
- c) des informations détaillées sur l'interface d'utilisation de l'équipement (par exemple, si le nouvel équipement de caractérisation proposé doit être utilisé en association avec l'équipement existant) ;
- d) la précision requise, y compris la précision et la sensibilité acceptables ;
- e) les tests de réception requis à l'usine et à l'emplacement prévu pour accueillir l'équipement afin de démontrer que le système (y compris le logiciel) est adapté à l'usage prévu ;
- f) la détermination de toute autre validation à effectuer par l'acheteur ;
- g) le degré d'expertise nécessaire et disponible pour faire fonctionner l'équipement ;
- h) une déclaration sur la maturité requise de l'équipement, par exemple si des technologies innovantes sont acceptées ;
- i) les pièces de rechange à conserver, la détermination des moments des réparations de l'équipement défectueux et les prescriptions relatives à la fréquence de maintenance ;
- j) les ressources financières disponibles (si cela constitue une contrainte) et une indication sur la question de savoir si l'équipement doit être loué ou acheté ;
- k) la mise à disposition d'une matrice de conformité indiquant en quoi le nouvel équipement proposé est (ou n'est pas) conforme aux prescriptions ci-dessus ;
- l) la mise à disposition de procédures opérationnelles et de formation.

L'exploitant doit fournir la preuve que tous les aspects ci-dessus sont pris en considération. Sur la base de ces exigences, il faudrait élaborer un plan de caractérisation des sources radioactives scellées comprenant la justification de la méthodologie et des techniques retenues. Ce plan devrait respecter les critères de réception des déchets de l'installation d'entreposage ou de stockage définitif qui accueillera les sources retirées du service. Il devrait en outre être élaboré en fonction des options et des techniques de récupération et de conditionnement déjà définies.

Toutes les informations relatives à la source doivent être collectées et classées de manière structurée pour en faciliter l'extraction en cas de besoin, et conservées en double exemplaire et dans des emplacements distincts. L'exploitant doit effectuer des audits à intervalles réguliers pour s'assurer que les informations enregistrées sont correctes.

7.4.2. Extraction des données historiques

L'extraction, la collecte et le traitement des données historiques constituent les premières étapes du processus de caractérisation [53]. Lors de l'extraction des données, il peut s'avérer nécessaire de consulter d'anciens employés ou des retraités qui peuvent être en mesure de fournir toute information pertinente. Une liste d'actions relatives à l'extraction des données peut inclure :

- a) l'identification des sources radioactives scellées ;
- b) la collecte d'informations sur les sources radioactives scellées pertinentes, y compris leurs propriétés physiques, chimiques et radiologiques, le nom du fabricant, des dessins, le numéro de série, la date de production, les utilisateurs de ces sources, la certification des essais d'étanchéité, les débits de dose mesurés, les matériaux de conditionnement (le cas échéant) ;
- c) en ce qui concerne les sources radioactives scellées conditionnées, l'identification de celles qui ont été encapsulées dans du béton, de la mousse de polyuréthane, de la cire de paraffine et/ou d'autres matrices ;
- d) l'identification des types de blindage supplémentaire utilisés pour les sources radioactives scellées (par exemple plomb, ciment, uranium appauvri) ;

- e) l'identification de l'emballage utilisé pour les sources radioactives scellées conditionnées ou non (par exemple sacs en plastique, conteneurs de transport blindés particuliers, fûts, caisses en métal et en bois) ;
- f) les groupes de sources radioactives scellées en vue de la caractérisation.

7.4.3. Caractérisation par les méthodes d'AND

S'il n'est pas possible d'extraire les données historiques, il faudrait tout mettre en œuvre pour caractériser les sources par les méthodes d'analyse non destructive (AND) indiquées dans la référence [53]. Si cette analyse non destructive de la source logée dans le dispositif associé ne donne pas suffisamment d'informations pour caractériser adéquatement la source radioactive scellée, on peut envisager de sortir celle-ci par étapes dudit dispositif et des structures de blindage. Au cours des opérations d'extraction et de caractérisation, toutes les précautions nécessaires devraient être prises pour maintenir le risque à un niveau aussi bas que raisonnablement possible.

Certaines sources scellées contenant de fortes énergies gamma peuvent être identifiées par des mesures gamma [53]. Les radionucléides suivants appartiennent à ce groupe : ^{22}Na , ^{60}Co , ^{85}Kr , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{226}Ra , $^{239}\text{Pu-Be}$ et ^{241}Am . Certaines sources de neutrons composés comme l' $^{241}\text{Am-Li}$, le $^{238}\text{Pu-Be}$, l' $^{241}\text{Am-Be}$ et le $^{226}\text{Ra-Be}$ peuvent également être identifiées en mesurant le rayonnement gamma de haute énergie produit par les réactions suivantes $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$, $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ et $^7\text{Li}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$. En outre, les rayons gamma de haute énergie produits par les réactions d'activation neutronique (n, γ) sur des matériaux de boîtier (par exemple aluminium, fer, titane) et des matériaux de protection contre les neutrons (par exemple paraffine borée) peuvent servir à identifier les sources de neutrons. On ne peut utiliser les radionucléides ^{238}Pu et ^{239}Pu pour l'identification par mesures gamma en raison de la faible intensité du rayonnement gamma.

Il faudra généralement obtenir des informations supplémentaires en utilisant d'autres techniques plus avancées (par exemple des méthodes d'analyse gamma [53]). La spectrométrie gamma permet d'identifier les différents radionucléides et, sous certaines conditions, leur activité. Pour l'analyse quantitative, il faut connaître l'absorption des rayons gamma dans la matrice des déchets et/ou le matériau de blindage des sources radioactives scellées ; pour ce faire, on utilisera principalement des informations a priori (par exemple géométrie de mesure, densité, composition de la matrice) ou des mesures de la transmission.

Les matières de sources radioactives scellées énumérées ci-dessous peuvent être détectées par des mesures neutroniques, des méthodes de comptage passif et/ou actif de neutrons [53]. Ce groupe comprend le $^{226}\text{Ra-Be}$, le ^{238}Pu , le $^{238}\text{Pu-Be}$, le ^{239}Pu , le $^{239}\text{Pu-Be}$, l' $^{241}\text{Am-Be}$, l' $^{241}\text{Am-Li}$ et le ^{252}Cf . Le détecteur de neutrons le plus couramment utilisé dans les systèmes d'AND est le compteur proportionnel au gaz ^3He , un détecteur de neutrons thermiques utilisé pour la détection de neutrons en combinaison avec un modérateur, par exemple le polyéthylène de haute densité. Certains types de débitmètres de neutrons portatifs sont équipés de détecteurs au BF_3 qui pourraient permettre de détecter des sources de neutrons par mesure de contact autour des blindages ou des colis de déchets.

L'utilisation de méthodes de caractérisation sophistiquées et coûteuses n'est pas justifiée pour les sources radioactives scellées qui ne présentent pas de risque radiologique et ne sont pas importantes pour la sûreté de la phase post-fermeture de la future installation de stockage définitif.

7.4.4. Caractérisation par les méthodes d'analyse destructive

Les méthodes d'analyse destructive ne devraient être envisagées que si cela est absolument nécessaire. Si une source radioactive scellée a été confiée à un laboratoire pour une analyse destructive, elle ne sera plus considérée comme une source scellée et devra être traitée et conditionnée ultérieurement conformément aux critères d'acceptation des déchets pertinents. On trouvera de plus amples informations sur cette question dans la référence [55].

7.5. CARACTÉRISATION DES SOURCES PRÉSENTANT DES FUITES

Avant de manipuler une source retirée du service, des tests de frottis prélevés sur la source devraient être effectués pour vérifier s'il y a des fuites (voir la figure 45). Des moniteurs de contamination par rayons alpha, bêta et X et gamma à faible énergie pourraient être utilisés pour détecter les fuites de la source par la méthode de frottis.



FIG. 45. Tests de frottis pour le contrôle de la contamination.

7.6. ENSEIGNEMENTS TIRÉS

La plupart des sources scellées retirées du service auront des émissions bêta et/ou gamma associées. Celles-ci peuvent être détectées avec un équipement peu sophistiqué comme un compteur Geiger-Müller (GM) avec une fenêtre en bout ou à paroi mince. Les moniteurs à scintillation, s'il y en a, sont préférés en raison de leurs temps de réponse plus courts. Cet équipement de base n'est ni approprié ni fiable si la source est un émetteur alpha ou neutronique, ou avec une source bêta logée dans un boîtier de blindage. Des instruments sensibles au rayonnement alpha ou neutronique peuvent être nécessaires si on s'attend à avoir des sources contenant de tels radionucléides.

Les mesures de débit de dose gamma donnent des informations préliminaires sur la présence de rayonnement gamma et peuvent servir, dans certaines conditions, à évaluer l'activité des sources. L'activité des sources radioactives scellées peut être quantifiée en utilisant le débit de dose mesuré, le facteur de conversion dose-activité et la composition en nucléides des sources (si elle est connue). L'expérience montre que les mesures de débit de dose ne suffisent pas pour caractériser pleinement les sources radioactives scellées, car il faut des informations détaillées supplémentaires telles que la composition en radionucléides, les matériaux d'encapsulation, les matériaux de structure, la matrice et le blindage.

La plupart des détecteurs employés en spectrométrie gamma utilisent des détecteurs à scintillation NaI (TI) (faible résolution), des semi-conducteurs (haute résolution) au HPGe (germanium haute pureté) et des détecteurs au CdTe (résolution moyenne). Des systèmes allant de dispositifs portatifs à des systèmes spécialement installés utilisant ces méthodes sont disponibles depuis un certain nombre d'années. Les systèmes à faible résolution nécessitent moins d'efforts d'entretien et n'ont pas besoin d'être refroidis.

Leur inconvénient est que seuls des spectres simples (moins de 10 pics de bonne résolution dans une gamme d'énergie de 35 à 1 500 keV) peuvent être recueillis et analysés. Cependant, ils peuvent être utilisés pour identifier les sources radioactives scellées présentes dans les déchets historiques si le niveau d'activité de ces sources est suffisamment élevé et compte tenu du fait que ce sont essentiellement des sources de « mononucléides ». Les systèmes à moyenne résolution (CdTe) constituent un bon compromis entre les systèmes à faible et à haute résolution. Les systèmes à haute résolution doivent être refroidis (azote liquide ou électro-refroidissement) et sont habituellement chers et moins robustes que les dispositifs fonctionnant à température ambiante. L'avantage de ces systèmes est qu'ils permettent de traiter un très grand nombre de pics de différents rayons gamma.

Du point de vue de la mesure, les sources blindées alpha ou bêta sont les plus difficiles à détecter et à mesurer. Les techniques inférentielles basées sur les principaux nucléides, qui peuvent servir à caractériser les processus bien qualifiés de production et de conditionnement de déchets, ne peuvent être utilisées pour caractériser les sources radioactives scellées.

8. MANUTENTION DES SOURCES

La manutention d'une source comprend toute manipulation physique de cette source, y compris le déplacement, le transfert, la relocalisation, le retrait d'un conteneur ou l'introduction dans un conteneur, le démontage de la partie de l'équipement la contenant, son retrait de l'équipement, la mesure, l'inspection ou les essais.

Comme indiqué dans les sections précédentes, les sources scellées contiennent des matières radioactives en concentration beaucoup plus élevée que les autres déchets radioactifs généralement manipulés dans une installation. Lors de la planification et de l'exécution des travaux mettant en jeu la manutention des sources, il faut tenir compte de la gravité potentielle accrue d'une perte de contrôle de la contamination et des expositions potentiellement élevées qui peuvent survenir pendant ce processus de manutention. La sûreté industrielle et radiologique doit être garantie lors de la manipulation de sources retirées du service.

Les sources scellées peuvent faire partie intégrante de l'équipement. Celui-ci peut être connecté à un processus chimique/physique et des précautions spéciales peuvent s'avérer nécessaires pour éviter certains dangers. Les sources scellées peuvent également être sous une forme chimique/physique unique qui peut nécessiter des précautions spéciales. Elles peuvent également fuir, ce qui rendra aussi nécessaires des mesures de radioprotection particulières.

8.1. PRESCRIPTIONS RELATIVES À LA SÛRETÉ DE LA MANUTENTION

Les utilisateurs doivent s'assurer que toutes les prescriptions nationales de radioprotection et celles ayant trait aux installations [11] sont respectées et que les contrôles appropriés sont en place à la fois pour diminuer le potentiel de dispersion de la contamination radioactive et pour réduire au minimum les expositions des personnes. Les principes de base exposés dans la présente section sont valables pour la gestion de toutes les sources, qu'elles soient utilisées, identifiées comme potentiellement retirées du service ou déclarées comme retirées du service. Ils s'appliquent également à toutes les étapes de la gestion de ces sources.

L'installation dans laquelle une source est utilisée devrait posséder les capacités appropriées pour la manutention de la source, y compris des outils de levage, des sources d'éclairage et d'alimentation adéquates, des instruments de surveillance radiologique et de contrôle de la contamination à distance et portatifs. La complexité et la sophistication des capacités de manutention sont directement liées aux dangers potentiels des sources concernées.

Lors de la manutention de sources retirées du service, certaines précautions doivent être prises pour éviter les dommages mécaniques à la source (par exemple qu'elle tombe de haut ou soit heurtée par un engin de manutention ou un chariot élévateur), garantir la fonctionnalité des systèmes de sûreté du porte-source (par exemple vérifier que le mécanisme de verrouillage des sources est intact), et protéger les opérateurs contre les rayonnements. Par conséquent, les règles de sûreté générale et industrielle doivent être respectées.

8.2. PLANIFICATION DU TRAVAIL

Les sources scellées présentent un risque radiologique potentiel lors de la manutention. Ce risque dépend du type de radionucléide, de l'activité de la source, de la forme chimique et physique, de la condition physique de la source et de la possibilité de fuites. Il importe d'évaluer pleinement le type et la nature de tous les risques encourus avant toute opération de manutention de la source. La dose d'exposition aux rayonnements doit être estimée pour la procédure particulière de manutention afin de prévoir des mesures de sûreté et de radioprotection.

Lors de la planification et de la mise en œuvre de la manutention des sources, il conviendrait de tenir compte des facteurs susceptibles d'influer sur la sûreté de la source et d'entraîner une exposition potentielle des travailleurs et du public et/ou la contamination de l'environnement. Ces facteurs doivent être pris en considération, que la source manipulée soit nue ou dans un conteneur, un emballage de transport, ou son boîtier/enceinte d'origine dans lesquels elle avait été utilisée comme partie d'un dispositif. Toutes les opérations de manutention doivent être planifiées, testées et mises en œuvre conjointement avec le personnel de radioprotection.

Outre les problèmes de protection radiologique, la manutention des sources nécessite généralement la manipulation et le déplacement de matériel lourd et volumineux, l'utilisation d'équipements de traction/levage et d'autres équipements de déplacement de matériel, et l'utilisation d'outils standard pour ouvrir et fermer les conteneurs. Toutes les procédures relatives aux dangers relevant de la sûreté industrielle et toutes les méthodes de protection devraient être évaluées et utilisées de manière appropriée.

La planification doit couvrir les aspects suivants :

- a) l'examen des documents d'autorisation délivrés par l'organisme de réglementation, en s'assurant que les opérations de manutention de la source à effectuer sont autorisées et que toutes les prescriptions particulières de licence sont respectées ;
- b) l'examen des caractéristiques des installations pour s'assurer qu'il y a des voies d'accès et de sortie appropriées, que le blindage et le système d'aération sont appropriés tels qu'ils sont installés ou peuvent être complétés pour prendre en charge des travaux particuliers, que les prescriptions relatives aux outils et aux équipements requis sont identifiées et satisfaites, qu'il y a des zones de stadification et d'entreposage ;
- c) l'identification des sources à manipuler ;
- d) la définition claire des tâches à exécuter et de leur ordre d'exécution ;
- e) la disponibilité d'opérateurs formés et qualifiés pour effectuer le travail, y compris ceux qui ont une expérience particulière à la fois des tâches à effectuer ainsi que des types de sources à manipuler et des activités pertinentes ;
- f) la détermination et l'adéquation des interventions en cas d'incident ou d'urgence.

8.3. GESTION COURANTE DES SOURCES

8.3.1. Collecte

La première étape de la manutention d'une source retirée du service est d'en prendre possession auprès de l'utilisateur ou à l'endroit où elle a été récupérée, en vue d'un entreposage sûr, en attendant une décision sur la future étape de la gestion. Ce travail est généralement effectué par l'organisme central de gestion des déchets radioactifs ou un organisme similaire, par exemple l'agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Il faut rassembler toutes les informations possibles sur la source avant d'en prendre possession.

La mesure la plus immédiate à prendre dès qu'une source orpheline est localisée est de s'assurer que les membres du public à proximité sont adéquatement protégés. Les dangers que représente une telle source pour le public dépendront à la fois de leur type et de leur gravité en fonction aussi bien de la source que des conditions dans lesquelles elle a été localisée. La mesure de protection la plus prudente et pourtant la plus efficace que l'on puisse prendre, dans toutes les circonstances, est d'isoler le public de la source. Le potentiel d'exposition tant externe qu'interne pourrait être réduit en limitant l'accès à la source et en en éloignant le public. L'établissement d'un contrôle d'accès au site d'une source orpheline peut être complétée par l'érection de barrières, la mise en place de panneaux/d'écriteaux, la protection de la source, des communications personnelles ou d'autres moyens.

La prise de possession appropriée d'une source qui fuit est une opération délicate, car elle peut entraîner la propagation de la contamination. Il faut donc un personnel bien qualifié et expérimenté pour

effectuer cette opération, qui met en jeu des tests d'étanchéité. Une source qui fuit doit être suremballée et manipulée dans des zones couvertes, par exemple par une feuille de plastique pour faciliter la décontamination et empêcher la propagation de la contamination.

8.3.2. Séparation

Compte tenu de la nécessité d'optimiser les opérations suivantes de gestion des déchets (c'est-à-dire la capacité des équipements de manutention, des équipements de protection, des équipements de surveillance, des emballages, des conteneurs d'entreposage), les sources retirées du service peuvent être triées et regroupées en fonction de l'option de gestion à appliquer, ou de leurs caractéristiques (radionucléides, période, activité, forme chimique et physique) ou encore de leurs types en tant que sources uniques, comme les sources au radium ou les sources de neutrons.

L'un des premiers critères du tri/de la séparation des sources est de savoir si la source se trouve dans un dispositif ou si elle est isolée. Toutes les sources se trouvant dans un dispositif qui doit être démonté doivent être séparées et placées dans une zone d'entreposage appropriée.

Le groupe suivant de sources qui pourrait être isolé en tant que stock unique est celui des sources de faibles activités et de périodes extrêmement courtes répondant aux prescriptions de l'État Membre visant à permettre à la source de se désintégrer jusqu'à ce qu'on ne puisse plus mesurer aucune activité détectable. Cela est généralement limité aux sources contenant des nucléides de périodes inférieures à 120 jours. Après la séparation des dispositifs à démonter et l'enlèvement des sources contenant des nucléides qu'on peut laisser se décomposer en vue de leur évacuation, les sources restantes peuvent être triées et séparées en fonction d'une combinaison de caractéristiques, y compris les voies d'utilisation potentielles, les types spéciaux de sources, et les sources de haute activité qu'on ne peut manipuler avec des outils à court ou à long manche.

Les sources restantes pour l'entreposage et le stockage définitif peuvent être encore triées comme le montre la figure 46. On pourra probablement stocker définitivement les sources bêta-gamma et les émetteurs alpha à courte période (non transuraniens) dans des installations terrestres de stockage peu profondes aux configurations de stockage définitif similaires. Bien souvent, ce genre d'installation sera probablement inapproprié pour le stockage définitif des émetteurs alpha à longue période qui resteront donc isolés, en entreposage, jusqu'à ce qu'une possibilité de stockage définitif appropriée soit disponible. Les sources de neutrons, les sources de radium et les sources de haute activité doivent être séparées en raison de leurs prescriptions particulières de conditionnement et de manutention.

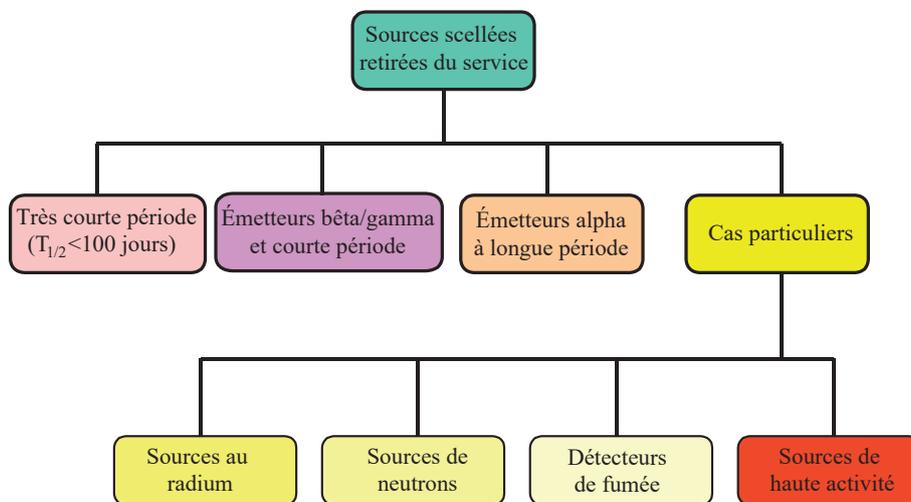


FIG. 46. Séparation opérationnelle des sources radioactives retirées du service.

Les sources ayant des caractéristiques similaires qui influent sur l'entreposage et le stockage définitif devraient être emballées ensemble. À ce stade, il est également possible de limiter le contenu des conteneurs pour permettre de respecter les limites d'activité et de débit de dose.

Si une source est endommagée, il faudra contenir la fuite possible. Les sources qui fuient doivent être séparées des autres sources et collectées séparément pour éviter la contamination croisée. Les dispositifs devraient être vérifiés pour détecter une éventuelle contamination, puis emballés conformément aux prescriptions de l'installation d'entreposage. Leur confinement temporaire peut être assuré, par exemple, en enveloppant le boîtier dans une feuille de plastique, ou en le mettant dans une poubelle ou un tambour en acier avant de sceller le couvercle. On peut normalement conserver ces dispositifs dans un entreposage à long terme avec ou sans emballage supplémentaire jusqu'à ce qu'on trouve une possibilité d'utilisation. Dans certains cas, il faudra en mettre plusieurs dans de grands conteneurs d'entreposage. Il faudrait donc faire un inventaire complet de tous les dispositifs de chaque grand conteneur, le tenir à jour et le mettre à la disposition de l'installation d'entreposage selon les besoins. Exception faite des considérations de sécurité pour les sources à haute activité et de très nombreux dispositifs contenant des sources plus petites, il n'y a généralement aucune justification pour l'enlèvement des sources du dispositif pour la maintenance dans l'entreposage si aucune voie d'utilisation n'est disponible.

8.3.3. Retrait des sources des dispositifs

L'entreposage et le stockage définitif des matières radioactives coûtent généralement cher ; par conséquent, s'il s'agit d'un grand nombre de sources radioactives scellées retirées du service, on peut envisager de les enlever des dispositifs d'origine et de les regrouper avec des sources similaires en vue de l'entreposage ou du stockage définitif. Cette option réduit le volume des colis de sources à entreposer ou à stocker.

Une fois retirées des dispositifs, les sources peuvent être transférées dans des conteneurs blindés pour entreposage. Ceux-ci peuvent être normalisés et les mesures de sûreté et de sécurité optimisées. Toutefois, il faut veiller à éviter d'endommager la source ou de nuire à son intégrité physique pendant le processus de retrait. Les sources endommagées et qui fuient nécessitent des précautions supplémentaires, ainsi que des équipements spécialisés assurant à la fois le blindage et le confinement.

La conception du conteneur blindé qui abritera éventuellement la source doit être telle que le débit de dose en surface sera acceptable, que la source sera protégée conformément aux réglementations pertinentes, et que la possibilité d'enlèvement non autorisé de la source sera réduite au minimum. Ces conteneurs devraient offrir une grande capacité interne et une flexibilité considérable pour l'entreposage des sources. Lorsque cela est possible, il ne faut choisir qu'un cas de figure, à savoir que les sources sont enlevées des dispositifs, ou y sont conservées. Aucun conteneur ne doit inclure les deux.

Cependant, le retrait des sources des dispositifs oblige à manipuler des sources nues, ce qui nécessite des qualifications spéciales, un lieu de travail bien conçu et protégé et des outils pour protéger le personnel chargé de l'opération contre des niveaux éventuellement élevés d'exposition aux rayonnements et de contamination radioactive. Ce genre d'expérience et d'infrastructure n'est disponibles que dans les organismes qui manipulent régulièrement des sources nues, par exemple chez les fabricants de sources et de dispositifs, le personnel de maintenance des sources/dispositifs ou le personnel des organismes de gestion des déchets qui s'occupent régulièrement d'un grand nombre de sources retirées du service. En principe, pour des raisons de radioprotection professionnelle, les sources des catégories 1 et 2 ne doivent être manipulées dans des installations de cellules chaudes ou des cellules chaudes mobiles désignées, par des opérateurs qualifiés et agréés disponibles chez les fabricants de sources et les organismes de recyclage. La manutention de sources nues de catégorie 3 et de la gamme supérieure de la catégorie 4 nécessite encore une expertise, un équipement et une licence particuliers.

La justification du retrait de la source du contenant d'origine doit être soigneusement évaluée au cas par cas. En ce qui concerne les sources sans voie de stockage définitif définie, il pourrait être plus approprié de les laisser dans les dispositifs jusqu'à ce qu'une voie d'utilisation soit disponible ou lorsque l'espace d'entreposage devient limité. Par ailleurs, seules des personnes formées et qualifiées devraient

tenter de retirer les sources de ces types de leurs dispositifs. En ce qui concerne les sources de haute activité, leur retrait du porte-source d'origine n'est envisagé que lorsque cela est absolument nécessaire.

Les points suivants doivent être pris en considération lors des préparatifs pour le retrait des sources :

- a) La connaissance de la distribution de dose à l'intérieur de l'équipement d'origine de la source dans les positions « marche » et « arrêt » est souhaitable ;
- b) un manuel d'entretien (en particulier en ce qui concerne le mécanisme de mouvement des sources radioactives scellées, le dépannage et les réparations diverses) devrait être disponible et bien compris ;
- c) les outils, matériaux, pièces ou équipements spéciaux nécessaires au retrait devraient être disponibles et contrôlés ;
- d) les données de conception, les diagrammes et toute photo/illustration pourraient être utiles ;
- e) il faudrait s'assurer que les boutons d'alimentation électrique et les verrouillages de sûreté du mécanisme de la source ou d'autres outils ou équipements sont en position « marche/arrêt » selon que de besoin et ne peuvent être activés ni désactivés par inadvertance ou par une manipulation frauduleuse pendant le travail ;
- f) le mouvement du tiroir de la source et l'alignement de l'orifice de déchargement devraient être garantis et ne devraient pas nécessiter d'inspection directe ni d'ajustement manuel pendant le transfert de la source ;
- g) les problèmes imprévus dus à des blocages de mécanismes devraient être bien étudiés et des solutions doivent être disponibles à ces problèmes potentiels avant l'opération elle-même. Il conviendrait de noter qu'une protection maximale est garantie lorsque la source se trouve dans l'équipement d'origine ou dans le blindage d'entreposage cible.

8.3.4. Relocalisation sur site

La relocalisation d'une source sur site consiste à la déplacer sur le site du titulaire de licence. Lorsqu'une source est déclarée retirée du service, elle devrait être enlevée du lieu d'utilisation et relocalisée dans une zone d'entreposage. Le déplacement d'une source radioactive scellée sur le site de l'exploitant n'est normalement pas couvert par le règlement national de transport. La relocalisation d'une telle source sur le site du titulaire de licence est généralement réglementée par le règlement local du site. Il est à noter que de nombreux titulaires de licence, en particulier dans les petites entreprises ayant un personnel limité, sont autorisés à utiliser la source, mais pas à la manipuler eux-mêmes. Ils doivent passer un contrat avec une entreprise externe autorisée à effectuer cette opération.

8.4. ÉQUIPEMENTS ET OUTILS DE MANUTENTION DES SOURCES

Dans les conditions normales d'exploitation, les sources radioactives sont manipulées dans les dispositifs d'origine, les conteneurs de transport ou d'autres structures qui protègent les opérateurs des fortes doses de rayonnement. Les colis peuvent être déplacés manuellement ou à l'aide d'un chariot élévateur. Lorsque, pour des raisons particulières, des sources radioactives nues doivent être manipulées, l'opérateur devrait en être aussi éloigné que possible afin de réduire la dose au minimum.

La manutention de sources scellées peut être trompeuse en termes de contrôle de la contamination. Même les sources anciennes utilisées depuis des années peuvent conserver l'apparence de nouvelles sources. Il n'est pas rare que des opérateurs expérimentés qui manipulent des sources deviennent imprudents, en se disant que les sources manipulées sont intactes et qu'il n'y a pas de fuite. Les utilisateurs devraient les encourager à considérer que les sources et les dispositifs qui les contiennent sont contaminés, jusqu'à preuve du contraire.

8.4.1. Tenailles et bouclier temporaire

D'une manière générale, on peut manipuler les sources de faible activité qui émettent un rayonnement de faible énergie manuellement (fig. 47) ou avec des outils de manutention courts tels que des tenailles ou des pinces (fig. 48). Les sources de ce type comprennent les sources d'étalonnage, les sources employées dans les applications médicales, les sources de contrôle et certaines sources utilisées dans les dispositifs industriels. La manutention de ce genre de source ne nécessite normalement aucune protection.



FIG. 47. Manutention manuelle d'une source.



FIG. 48. Outils de courte taille pour la manutention manuelle des sources.

On peut aussi manipuler certaines sources d'activité et de débits de dose plus élevés que celles décrites ci-dessus manuellement avec des outils appropriés comme de longues pinces (fig. 49), mais elles doivent être blindées pour réduire les doses reçues par l'opérateur (fig. 50). Les sources les plus courantes de ce groupe sont les sources de curiethérapie à faible débit de dose contenant du césium et les sources des jauges d'épaisseur (^{85}Kr , ^{90}Sr), des jauges de niveau de remplissage ou d'épaisseur (^{137}Cs), des jauges de densité (^{137}Cs), des jauges de densité de l'humidité ($^{241}\text{Am-Be} - ^{137}\text{Cs}$), d'ostéodensitométrie (^{109}Cd) et des éliminateurs d'électricité statique.



FIG. 49. Longues pinces et manipulation des sources avec ces outils.

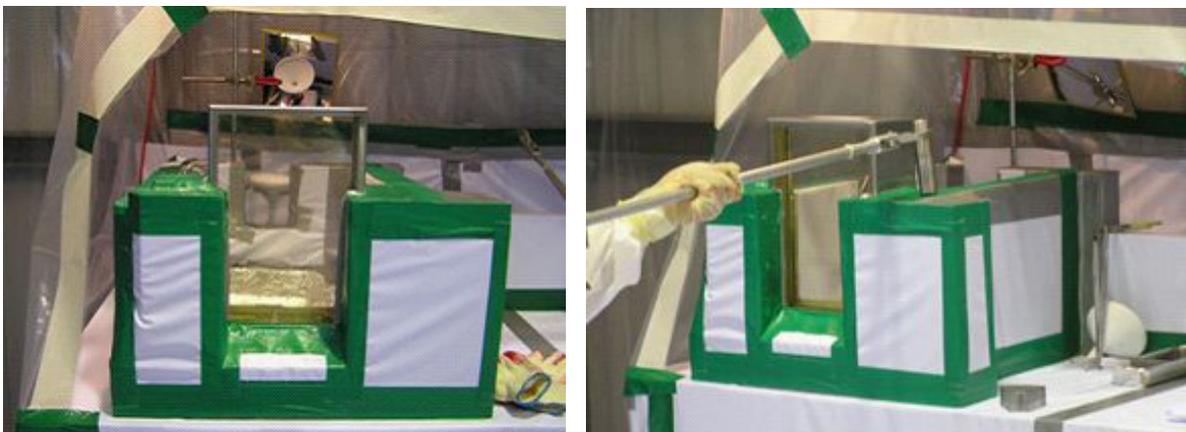


FIG. 50. Installation du bouclier en plomb et du verre au plomb et manipulation de la source.

Un bouclier temporaire peut être utilisé efficacement pendant les opérations de manipulation de la source pour réduire la dose à laquelle sont exposés les travailleurs. Lors du choix et de l'utilisation du bouclier, les utilisateurs devraient tenir compte des éléments suivants :

- Un bouclier qui déborde ou dont la position entrave les activités peut en fait augmenter la dose aux travailleurs. Il faut évaluer soigneusement la performance de travail par rapport à la réduction de dose potentielle offerte par le bouclier pour trouver un bon équilibre.
- Il faudrait choisir et utiliser des matériaux de protection appropriés.
- Il faudrait utiliser du verre au plomb ou d'autres fenêtres permettant aux utilisateurs de voir tout en se protégeant de la source.

8.4.2. Sorbonne

Une sorbonne (ou boîte à gants) est un moyen simple, sûr et efficace de protéger l'opérateur et d'éviter la propagation de la contamination lors de la manipulation de sources de faible activité qui

fuient/sont contaminées ou de sources au radium. C'est une enceinte de sûreté comprenant une ouverture à travers laquelle l'opérateur peut effectuer des manipulations à l'intérieur de l'enceinte, l'air étant continuellement évacué de celle-ci à un rythme suffisant pour éviter que la contamination aérienne ne s'échappe de l'intérieur (fig. 51). Un bouclier temporaire sous forme de briques de plomb pourrait être installé à l'intérieur de la sorbonne pour réduire la dose reçue par l'opérateur lors de la manutention de sources à débit de dose élevé. Cette approche permettra de réduire les coûts au minimum et de fournir aux opérateurs un environnement de travail sûr avec un maximum de flexibilité.



FIG. 51. Boîte à gants pour la manutention de sources scellées de faible activité.

Dans la sorbonne, où l'espace est limité, l'utilisation de pinces ou de longues tenailles peut permettre à l'opérateur d'être aussi loin que possible des sources (fig. 52).



FIG. 52. Déplacement d'une source scellée à l'aide de tenailles à long manche.

Il faut reconnaître que la manipulation à l'aide de tenailles et de pinces ne permettra de soulever que de faibles masses (maximum 2 kg confortablement).

8.4.3. Cellules chaudes

Il n'est pas toujours possible d'enlever les sources de haute activité de l'équipement dans les locaux de l'utilisateur. Cela peut être parce que l'équipement a été conçu pour que la source puisse être enlevée dans une cellule blindée, ou parce que les informations techniques sont insuffisantes pour le faire de manière sûre en dehors d'une telle cellule. Dans ces cas, il faut transporter la source dans son blindage pour la faire enlever dans une installation blindée telle qu'une cellule chaude. La sophistication et la complexité des cellules chaudes équipées de télémanipulateurs/manipulateurs-esclaves sont très variables, mais la plupart d'entre elles sont parfaitement appropriées en fonction des sources à manipuler (fig. 53).

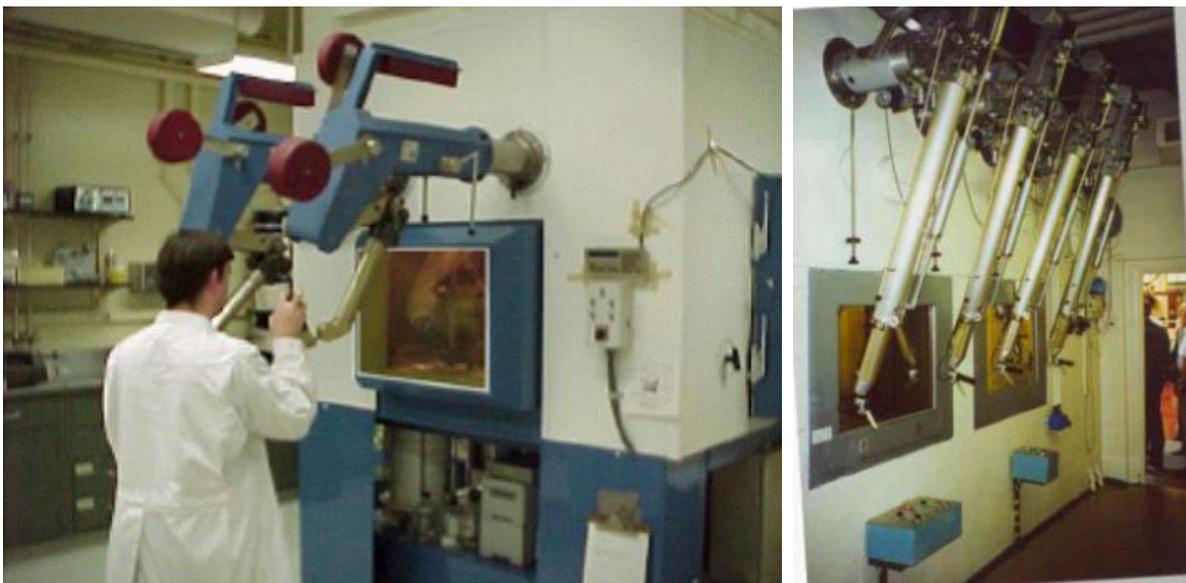


FIG. 53. Cellules chaudes avec télémanipulateurs/manipulateurs-esclaves.

8.4.4. Conteneurs

Lors de la relocalisation des sources retirées du service sur le site du titulaire de licence, il est important qu'elles soient conservées dans le conteneur d'origine. S'il s'agit d'équipements de radiographie ou de téléthérapie, les sources doivent être bien gardées dans leur conteneur blindé. Si on utilise des conteneurs autres que les conteneurs d'origine, la conception de ce nouveau conteneur doit tenir compte de la géométrie de la source, du radionucléide, de son activité et des exigences de manipulation. La figure 54 présente un exemple de conteneur couramment utilisé pour la relocalisation de sources sur site.



FIG. 54. Conteneur pour les sources bêta-gamma scellées.

Les conteneurs ou les dispositifs utilisés pour déplacer une source radioactive scellées sur un site doivent être bien étiquetés pour avertir du danger potentiel. Il est important que le panneau de mise en garde soit dans la langue locale, ainsi que dans celle du fabricant. L'utilisation du symbole du trèfle à lui seul est insuffisante, car les gens peuvent ne pas comprendre sa signification.

Les principales prescriptions de conception applicables aux conteneurs utilisés pour la relocalisation des sources radioactives scellées sur un site sont les suivantes :

- l'enceinte et le blindage du colis doivent rester intacts pendant le processus de relocalisation ; le conteneur doit être fermé mécaniquement lorsqu'il est soumis aux contraintes physiques associées au transfert lors de ce processus ;
- le débit de dose maximum sur le conteneur doit être conforme au principe ALARA et aux prescriptions de radioprotection du titulaire de licence ; dans tous les cas, il ne devrait pas dépasser les limites de débit de dose indiquées dans le Règlement de transport de l'AIEA, c'est-à-dire qu'il doit être inférieur à 2 mSv/h à la surface et à 0,1 mSv/h à 1 m de la surface du colis à tout moment pendant le transfert [47] ;
- la contamination radioactive à la surface du conteneur doit être aussi faible que possible et conforme aux prescriptions de protection radiologique du titulaire de licence. En aucun cas, elle ne devrait dépasser les limites indiquées dans le Règlement de transport de l'AIEA : 4 Bq/cm² pour les émetteurs bêta et gamma et les émetteurs alpha de faible toxicité et 0,4 Bq/cm² pour tous les autres émetteurs alpha.

8.4.5. Matériel de levage et de transfert

Divers équipements de levage et de transfert sont utilisés pour les sources retirées du service en fonction de leur activité, de leur taille et de leur poids. La figure 55 présente un exemple d'équipement de levage utilisé pour une tête de téléthérapie lourde.



FIG. 55. Traction et levage d'une tête de téléthérapie.

Un chariot tiré à la main d'une capacité de 500 kg devrait normalement suffire pour l'opération de transfert. Il faudrait un chariot élévateur manuel à fourche avec une pince à fûts pour décharger la source du chariot dans l'entrepôt. Un chariot élévateur électrique (fig. 56), nécessitera certainement moins d'effort manuel, et sera plus approprié pour les sources lourdes retirées du service et lorsqu'on doit manipuler un grand nombre de sources en un court laps de temps. Un bras fixé sur le chariot élévateur permettra de soulever les sources lourdes (fig. 57), de les déplacer partout dans l'installation et de les retirer des pots de protection des conteneurs de transport, ainsi que des sangles de levage, des anses, des chaînes et des boulons à œil.

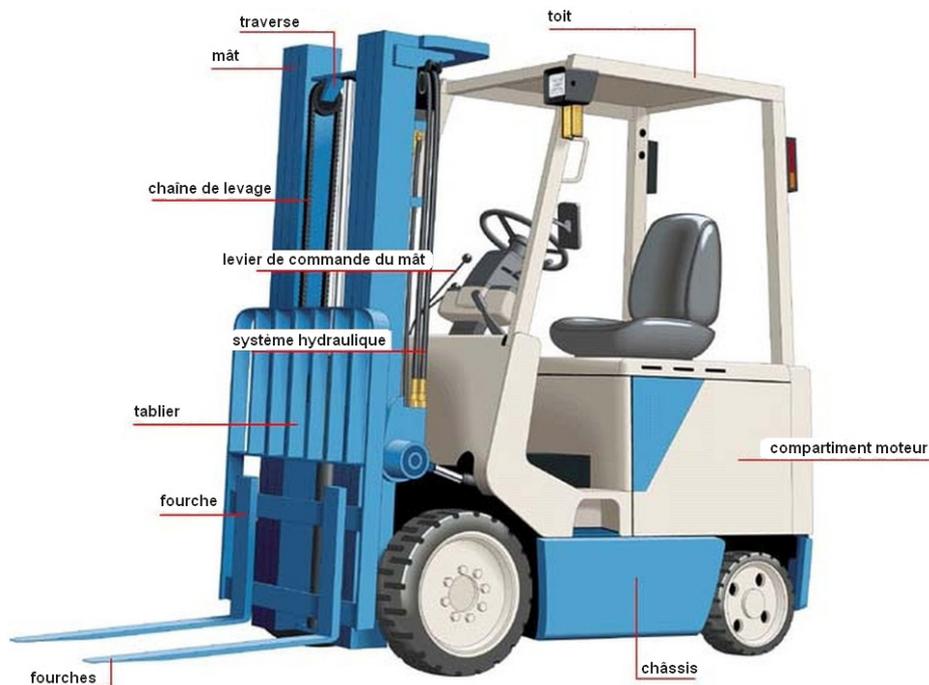


FIG. 56. Chariot élévateur électrique



FIG. 57. Manutention d'un fût de déchets de 200 L avec un chariot élévateur.

8.5. PROBLÈMES LIÉS À LA MANUTENTION DES SOURCES DE HAUTE ACTIVITÉ

La préparation d'une source en vue de l'entreposage peut prendre deux formes : la source peut être enlevée de son emplacement et transférée sur un site d'entreposage sous le contrôle de l'organisme utilisateur (cette option est applicable aux sources des catégories 1 à 5). L'autre option est de l'entreposer de façon sûre sur le site d'opérations (cette option est envisagée principalement pour les sources de catégorie 1).

Si c'est la première option susmentionnée qui est choisie pour des sources des catégories 1 et 2, il faudra une infrastructure suffisante (c'est-à-dire industrielle et nucléaire) pour la mettre en œuvre. À ce stade, le processus ne nécessite ni la séparation des sources de l'enceinte blindée de travail ni la désactivation d'un quelconque mécanisme de verrouillage ou dispositif de sûreté. La source reste dans son conteneur et n'est pas exposée. Elle doit être transférée de son enceinte de travail dans un conteneur de transport par un personnel formé conformément aux procédures approuvées. Ce conteneur est spécialement conçu pour l'équipement dans lequel la source peut être transférée sans être exposée. Il faut souligner que l'efficacité du blindage d'origine et de toutes les fonctions de sûreté/sécurité est maintenue à ce stade de l'opération.

Si l'équipement des sources de catégorie 1 est un équipement fixe d'une installation, on peut opter pour l'entreposage sur site, en évitant que la source ne soit exposée (fig. 58). Il faut prendre des mesures pour faire en sorte qu'elle soit effectivement protégée, à l'abri des conditions environnementales et que la possibilité d'intrusion soit minimale. Cette installation doit être régulièrement inspectée. Si la source (blindée) est entreposée dans une piscine (dans le cas d'irradiateurs de type piscine), la qualité et le niveau de l'eau doivent être maintenus pendant toute la durée de l'entreposage.

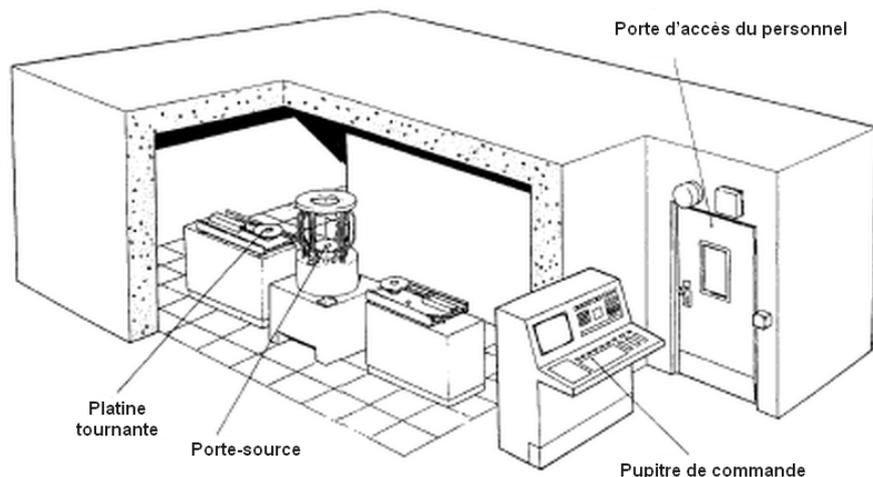


FIG. 58. Vue panoramique d'un irradiateur courant d'entreposage à sec.

La source de catégorie 1 doit être davantage sécurisée en ajoutant des mécanismes de sécurisation pour faire en sorte qu'elle ne soit pas exposée par inadvertance. Toutefois, ces mécanismes doivent être conçus de telle manière que l'on puisse retirer la source à une date ultérieure. Il faut fixer au mécanisme de sécurité une étiquette durable pour indiquer sa fonction, la raison de son installation, les mises en gardes ou les précautions qui doivent être signalées, et une référence à toutes les instructions et autorisations qui peuvent être nécessaires pour son enlèvement.

9. ENTREPOSAGE

L'entreposage consiste à garder des sources radioactives, du combustible usé ou de déchets radioactifs dans une installation où leur confinement est assuré, dans l'intention de les récupérer [1]. C'est par définition une mesure provisoire qui pourrait être mise en œuvre sur site ou dans une installation d'entreposage spécialement conçue et construite. Le Code de conduite prévoit que chaque État devrait veiller à ce que les sources scellées ne soient pas entreposées pendant de longues périodes dans des installations qui n'ont pas été conçues pour un tel entreposage. La meilleure façon de gérer la période d'entreposage en attendant le déclassement et le stockage définitifs doit être choisie par la partie principale, avec l'approbation de l'organisme de réglementation, en tenant compte des circonstances particulières de l'installation.

L'entreposage dans les locaux de l'utilisateur (c'est-à-dire l'entreposage sur site) d'une source radioactive scellée retirée du service peut être nécessaire soit pour permettre à l'activité de la source de décroître aux niveaux de libération [11, 57 à 59], soit avant de la transférer vers un autre emplacement. Avec l'approbation de l'organisme de réglementation approprié, une source contenant une activité totale ou une concentration d'activité inférieure aux niveaux d'exemption spécifiés dans les NFI [11] peut être exemptée de l'intégralité ou d'une partie des prescriptions des NFI concernant la notification, l'enregistrement ou l'autorisation, et pourrait être stockée définitivement dans une décharge approuvée. La période d'entreposage sur site doit être aussi courte que possible. Il conviendrait de noter que le fait de conserver une source radioactive scellée retirée du service dans un entrepôt sur site sans respecter les prescriptions appropriées est la cause la plus fréquente d'accidents et de perte de contrôle des sources. Toutefois, il faudrait reconnaître que pendant un certain temps, il n'y aura peut-être pas d'autre possibilité viable à part l'entreposage sur site.

Les contrôles administratifs et la sécurité ne seront probablement pas appropriés dans l'installation de l'utilisateur pendant la période nécessaire pour que la source se désintègre aux niveaux requis. Il faut avoir des plans en vue du transfert des sources entreposées sur site et leur état doit être maintenu pour faciliter leur transport et leur retrait du porte-source à ce stade.

Les pays qui utilisent largement les sources radioactives scellées et dans lesquels de nombreux établissements possèdent des sources radioactives scellées retirées du service ont besoin d'un entrepôt centralisé et d'un système d'entreposage approprié pour ces sources. La référence [60] décrit un modèle de référence de l'AIEA pour une installation d'entreposage centralisé de ces sources. Il convient de souligner que la plupart des États Membres n'ont pas d'installations de stockage définitif appropriées et, par conséquent, l'entreposage à long terme est bien souvent la seule autre option de gestion possible pour les sources radioactives scellées retirées du service dans un avenir prévisible. D'une manière générale, un entreposage centralisé est rarement utilisé dans la pratique exclusivement pour les sources radioactives scellées retirées du service conditionnées, et sert aussi pour d'autres types de déchets radioactifs de faible et moyenne activité produits dans le pays.

L'emballage de la source radioactive scellée retirée du service est considéré comme la première barrière au rejet de radioactivité dans l'environnement. Les barrières les plus importantes sont d'abord et avant tout la capsule de la source elle-même, et ensuite le conteneur. La dernière barrière physique au rejet de radioactivité est le bâtiment d'entreposage. Il devra fournir une protection suffisante aux sources entreposées pour optimiser la durée de vie des colis, ce qui peut nécessiter le contrôle et la surveillance de l'environnement du bâtiment. Il faut satisfaire aux prescriptions de sûreté relatives à la protection de la santé humaine et de l'environnement par une conception, une construction, une exploitation et une maintenance appropriées des installations correspondantes, et une conception appropriée des colis à entreposer.

9.1. PRESCRIPTIONS RELATIVES À LA CONCEPTION DES COLIS DE SOURCES RADIOACTIVES SCÉLÉES RETIRÉES DU SERVICE

Chaque colis de déchets contenant une source radioactive scellée retirée du service et destiné à l'entreposage doit satisfaire à un ensemble de prescriptions de base (généralement appelées critères d'acceptation des déchets ou prescriptions concernant l'acceptation des déchets) spécifiées par l'exploitant de l'installation d'entreposage [61, 62]. Ces prescriptions sont basées sur l'évaluation de la sûreté et les considérations connexes, ainsi que sur des questions techniques et juridiques. Elles sont normalement examinées et approuvées par l'organisme de réglementation qui peut aussi les définir lui-même. Les prescriptions générales d'acceptation pour l'entreposage des colis de déchets sont présentées dans la référence [61]. En ce qui concerne l'application aux sources radioactives scellées retirées du service, un colis destiné à l'entreposage doit :

- a) renfermer un conteneur et une source incorporée, et si nécessaire un système de confinement supplémentaire (par exemple, un revêtement ou un suremballage) pour contenir la matière radioactive pendant l'entreposage et garantir que tout rejet de cette matière reste en dessous des limites spécifiées ;
- b) avoir un couvercle avec des dispositifs de fixation pour empêcher celui-ci de se détacher du corps du conteneur pendant les activités ordinaires de manutention et d'entreposage ;
- c) avoir un débit de dose de contact et un niveau de contamination conformes aux prescriptions de l'installation d'entreposage ; si le colis est contaminé, des mesures doivent être prises pour contenir la contamination pendant la période d'entreposage provisoire prévue ; un débit de dose maximal admissible à la surface de chaque colis doit être défini pour des installations d'entreposage provisoire données ou des parties de ces installations ;
- d) assurer un refroidissement passif adéquat des sources de haute activité (déchets calogènes), le cas échéant ;
- e) avoir une certaine résistance mécanique pour supporter une pile de plusieurs colis (à préciser pour une installation d'entreposage particulière) ;
- f) être identifiable de manière unique, avec une plaque signalétique indiquant le type d'emballage, le numéro de série, le poids et le numéro d'enregistrement (des exemples d'étiquettes sont présentés à la figure 59).

S'il n'y a pas d'installation de stockage définitif, il faudrait comparer les critères d'acceptation des déchets du dépôt à ceux de l'installation d'entreposage et choisir les critères les plus limitatifs pour les colis de sources radioactives scellées retirées du service. Ceux-ci peuvent être soumis à des contraintes supplémentaires en raison de limitations ou de conditions spéciales en place dans l'installation d'entreposage, qui n'existent pas sur les sites de stockage définitif. Par exemple, le chargement au sol et les dimensions d'entrée peuvent limiter la taille et le poids des colis autorisés pour entreposage.



FIG. 59. Étiquetage de colis préparés pour l'entreposage et le transport.

9.2. PRESCRIPTIONS RELATIVES À LA CONCEPTION DES INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE

Les prescriptions relatives au fonctionnement du système d'entreposage doivent tenir compte de toutes celles ayant trait à ses utilisateurs, y compris leurs particularités propres et leurs centres d'intérêt, et doivent être basées sur les objectifs et les tâches de ce système. Les prescriptions de sûreté établies dans la référence [27] en ce qui concerne la protection de la santé humaine et de l'environnement sont applicables à l'entreposage des déchets radioactifs, et notamment des sources radioactives scellées retirées du service.

Les prescriptions relatives à la conception des installations d'entreposage des déchets sont présentées en détail dans les références [61 à 63]. Le cas échéant, une installation d'entreposage devrait avoir une conception simple et robuste, contenir un minimum d'infrastructures, éviter les systèmes automatiques sophistiqués, s'appuyer sur la sûreté passive et fonctionner de manière simple et économique.

Les prescriptions générales de conception des installations d'entreposage des sources radioactives scellées retirées du service sont les suivantes :

- a) Elles devraient être conçues de manière à réduire au minimum la probabilité d'incidents et d'accidents ainsi que leurs conséquences. Il doit être possible de récupérer les sources pour le conditionnement, le reconditionnement ou la relocalisation en cas d'accident.
- b) L'entrepôt doit être en mesure de maintenir l'intégrité de la source et de son conteneur ou dispositif jusqu'à ce que ceux-ci soient envoyés dans un autre emplacement (c'est-à-dire le dépôt). Il faut tenir compte de la nécessité d'assurer la protection contre les effets de l'environnement, par exemple la pluie, l'humidité, les inondations et les incendies.
- c) L'emplacement de l'entrepôt doit être séparé et éloigné des lieux de travail ou d'autres zones où vont régulièrement le personnel ou le public.
- d) L'accès doit être facile, y compris le transfert des sources vers et depuis l'entrepôt (par exemple, un ascenseur plutôt qu'un escalier).
- e) La capacité de chargement au sol doit être prise en compte.

- f) Il faudra installer des barrières physiques contre les intrusions, barrières qui pourraient inclure, le cas échéant, la surveillance, des verrous de haute sécurité, un système d'alarme, des gardes formés ou toute combinaison de ceux-ci. Les mesures de protection physique doivent être vues comme un tout, en tenant compte de l'effet combiné des différentes précautions.
- g) Il faudra des marquages et des mises en garde clairs dans l'entrepôt et sur son périmètre pour indiquer qu'il y a des matières radioactives et que l'accès est limité et n'est pas autorisé. Les panneaux de mise en garde devraient être conçus de manière à ce que la nature du risque soit évidente pour le personnel qui pourrait les voir. Ils doivent être installés même si des mesures de sécurité sont en place, et rédigés dans les langues que comprennent les personnes qui pourraient éventuellement entrer dans l'installation.
- h) Le dépôt doit être suffisamment spacieux pour permettre d'entreposer les sources de manière ordonnée et de pouvoir identifier visuellement les différents groupes de sources.
- i) Les surfaces doivent être lisses à l'intérieur du dépôt pour faciliter une éventuelle décontamination.
- j) La conception du dépôt devrait permettre d'y entreposer séparément les sources radioactives scellées retirées du service et les matières non radioactives.
- k) La conception du dépôt devrait permettre d'y entreposer séparément (dans des zones clairement séparées) les sources conservées pour décroissance, celles utilisées et celles qui ne se prêtent pas à l'entreposage pour désintégration.
- l) Les sources de haute activité des catégories 1 et 2 doivent être entreposées de préférence dans un entrepôt séparé, ou au moins séparément dans une zone clairement définie. Les personnes autorisées à entrer dans ce magasin ou cette zone doivent avoir une formation appropriée sur la présence et l'importance de ces sources.
- m) La conception de l'entrepôt devrait prévoir un bouclier (sous forme de murs ou de matériau de protection mobile) pour garantir que le débit de dose en tout point accessible à l'intérieur ou à l'extérieur de l'entrepôt ne dépasse pas les limites applicables prescrites par l'organisme de réglementation. Des principes d'autoblindage pourraient également être appliqués, en arrangeant les sources de manière à les protéger contre d'autres sources. Lorsque le personnel doit entrer fréquemment dans l'entrepôt, il est important d'envisager la mise en place d'une protection appropriée.
- n) La ventilation doit être appropriée si on peut s'attendre à un rejet de matières radioactives dans l'air, en particulier lorsque les colis entreposés contiennent des quantités importantes d' ^{125}I , d' ^{131}I ou de ^{226}Ra .

Certaines installations anciennes d'entreposage comportent des compartiments en surface et des parties souterraines. Ces dernières offrent généralement une meilleure protection, mais il a été noté que l'environnement y est plus humide.

Il importe que l'installation d'entreposage soit agréée par l'organisme de réglementation, si elle n'a pas déjà été prise en compte dans la licence d'exploitation. Cette licence pourrait inclure certaines prescriptions particulières pour l'installation.

9.3. PRESCRIPTIONS RELATIVES À L'EXPLOITATION DES INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE

Les opérations effectuées dans une installation d'entreposage se limitent à la réception, à la mise en place, au contrôle d'intégrité (si nécessaire), à la récupération et à la préparation pour l'expédition des colis de sources radioactives scellées retirées du service. Elles sont essentiellement passives pendant la longue période au cours de laquelle les colis sont en attente de récupération jusqu'à ce que le dépôt soit établi. Toutes les opérations pertinentes doivent être effectuées conformément aux procédures écrites autorisées.

9.3.1. Réception et mise en place

Les zones d'entreposage sont désignées et exploitées comme zones contrôlées afin de limiter la propagation de la contamination et de réduire au minimum l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. Des vêtements/équipements de protection adéquats doivent être mis à disposition et portés/utilisés selon les besoins.

Les réceptions de sources radioactives scellées retirées du service devraient être planifiées à l'avance. Le responsable de l'entrepôt examine les informations pour confirmer que le colis de sources est acceptable pour l'entreposage (par exemple qu'il est conforme aux critères d'acceptation des déchets pertinents). Si le colis n'est pas acceptable, ces informations devraient être enregistrés et les documents renvoyés à l'expéditeur avec une explication ou une demande d'informations complémentaires. En cas de contamination externe, le colis doit être décontaminé et revérifié avant d'être accepté pour entreposage.

La conception de l'installation devrait normalement permettre l'empilage, le tri et l'inspection visuelle des colis. Lors de l'acceptation, le responsable de l'entrepôt doit préparer la documentation appropriée pour l'entreposage des sources. Un emplacement approprié doit être déterminé pour le colis de sources radioactives scellées retirées du service et les informations qui s'y rapportent doivent être enregistrées. Le colis devrait être placé à l'emplacement désigné. Il est souhaitable que les sources soient séparées pour faciliter la récupération en vue d'un reconditionnement ultérieur ou toute récupération non planifiée jugée nécessaire par les inspections périodiques en raison d'une éventuelle dégradation des conteneurs des sources, ou dans le cas où des catégories particulières de sources doivent être ultérieurement placées dans des installations particulières de stockage définitif. Il faut actualiser régulièrement les relevés d'inventaire de l'entrepôt et vérifier périodiquement les articles entreposés par rapport aux informations enregistrées.

La figure 60 présente un exemple d'entreposage avec séparation des colis de déchets radioactifs.



FIG. 60. Entreposage séparé de déchets radioactifs, notamment de sources radioactives scellées retirées du service.

9.3.2. Protection supplémentaire

On peut ajouter une protection supplémentaire à celle envisagée dans la conception de l'entrepôt pour les colis dont les débits de dose de contact sont élevés et lorsqu'un grand nombre de colis de faibles débits de dose de contact sont placés dans l'entrepôt.

9.3.3. Contrôle d'intégrité

Étant donné que l'efficacité à long terme des barrières artificielles ou naturelles contre le rejet de radioactivité dans l'environnement ne peut être garantie pour toutes les conditions futures, un programme de surveillance de la zone d'entreposage doit être établi. Si cela est techniquement possible, il faut exercer une surveillance entre les différentes barrières (par exemple, le colis, la limite de l'entrepôt et celle de l'installation) afin de détecter la propagation de la radioactivité bien avant qu'elle ne sorte de l'installation. Dans ce cas, des mesures doivent être prises pour réduire au minimum la propagation de la contamination. Il est donc conseillé d'effectuer et d'enregistrer les mesures initiales du fond naturel de rayonnement de l'installation d'entreposage avant sa mise en service. La fréquence des contrôles dépendra du nombre et des types de colis de sources radioactives scellées retirées du service.

Le programme de surveillance doit comprendre l'efficacité du système de ventilation. Le contrôle radiologique et la dosimétrie individuelle sont obligatoires.

9.3.4. Récupération et expédition

À la suite de la réception d'une demande de récupération d'un colis, le responsable de l'entrepôt doit extraire les informations relatives à ce colis particulier des archives de l'entrepôt et les transmettre à la partie appropriée. Si ces informations sont en règle, le retrait du colis de l'installation d'entreposage peut être approuvé. Une fois que le responsable de l'entrepôt a autorisé la sortie du colis, celui-ci est retiré de l'entrepôt et transporté dans la zone d'expédition où l'on contrôle ses niveaux de contamination et de rayonnement avant de le libérer. Les informations relatives au colis sont transférées dans les registres de transport et le colis est remis pour le transport conformément au Règlement de transport [47]. Les registres d'entreposage des colis doivent être modifiés pour refléter la date d'expédition et le destinataire.

9.3.5. Système de sécurité

Les systèmes de sécurité destinés à empêcher les intrusions doivent faire partie intégrante d'une installation d'entreposage. Un système de sécurité classique comprend des fonctionnalités visant à retarder l'accès, à détecter les accès non autorisés, ainsi qu'un système d'alarme et d'intervention. La figure 61 présente un exemple d'installation d'entreposage sécurisée. Le personnel d'exploitation doit veiller à ce qu'il fonctionne sans interruption dans toutes les circonstances prévisibles.



FIG. 61. Installation d'entreposage sécurisée.

L'accès aux zones d'entreposage doit être strictement contrôlé afin d'éviter les pertes de matières entreposées, car ces pertes peuvent n'être détectées que bien après les faits. La sécurité des entrepôts est habituellement assurée par le verrouillage des locaux. Le personnel ayant un accès autorisé doit être réduit au minimum. Des scellés peuvent être utilisés pour détecter tout accès non autorisé. D'autres mesures de sécurité appropriées (gardes, clôtures en fil de fer barbelé, caméras de surveillance, systèmes d'alarme, etc.) et un inventaire régulier doivent être envisagés dans le contexte de la situation de sécurité. L'efficacité du système de sécurité doit être régulièrement vérifiée et le système mis à jour.

9.4. EXEMPLES D'INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE SUR SITE

On peut envisager de nombreux autres systèmes d'entreposage qui pourraient répondre aux prescriptions susmentionnées. En fonction du nombre de sources à entreposer, les dispositions d'entreposage peuvent varier, allant d'un coffre-fort au sol et d'une armoire blindée à un bâtiment dédié. La présente publication ne donne que quelques exemples pour illustrer les options d'entreposage possibles. Un utilisateur peut trouver que l'une de ces options répondra à ses besoins particuliers, mais il convient de souligner que d'autres dispositions peuvent également convenir, compte tenu des conditions locales. Il faut déterminer la plus économique des diverses options appropriées disponibles.

9.4.1. Coffres-forts au sol

Cette option, qui ne convient qu'aux sources les plus petites et à un nombre limité de conteneurs de petite taille, utilise des coffres-forts au sol produits en série, peu coûteux, facilement disponibles et reconnus comme système sécurisé. Une intrusion non autorisée est assez difficile, et le coffre-fort lui-même serait très difficile à emporter, en particulier s'il est installé dans la fondation du bâtiment. La figure 62 présente un modèle courant de coffre-fort au sol.

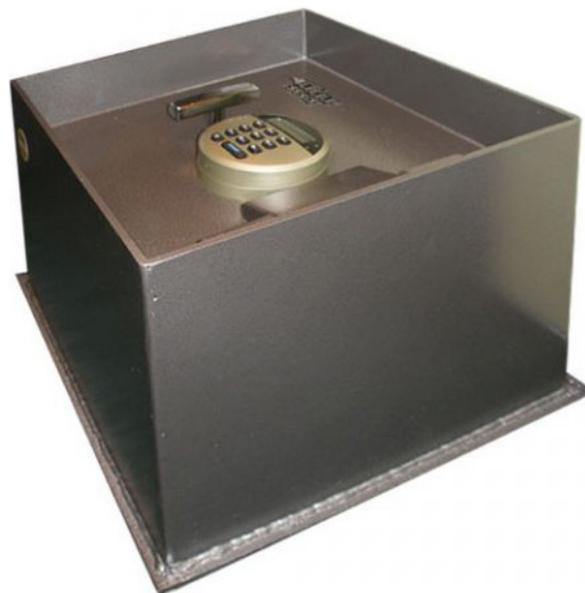


FIG. 62. Coffre-fort au sol courant.

Les coffres-forts, d'une capacité d'entreposage de 30 à 60 l, protègent contre diverses agressions physiques, telles que l'utilisation de leviers, de masses, de meuleuses, de perceuses, de chalumeaux oxyacétyléniques et d'explosifs. Ils peuvent être recouverts de béton armé et convertis en système d'entreposage à long terme à accès restreint et surveillance minimale.

9.4.2. Pièces résistantes aux intrusions

Cette option convient à tous les colis, quelle que soit leur taille. Une pièce résistante aux intrusions sera généralement construite avec des murs en béton, une porte sécurisée, des serrures haute sécurité et une alarme anti-intrusion. Les colis de petite taille et de taille moyenne peuvent être disposés sur des étagères (fig. 63), tandis que les grands conteneurs seront déposés sur le sol (fig. 64). Comme mesure de sécurité supplémentaire, des coffres-forts au sol, chacun contenant plusieurs petits colis, peuvent être placés dans une pièce résistante aux intrusions. Ce système peut permettre d'entreposer en sécurité un grand nombre de sources, tout en offrant un accès facile en cas de besoin.



FIG. 63. Entreposage de sources radioactives scellées retirées du service sur des étagères.



FIG. 64. Entreposage de sources radioactives scellées retirées du service au sol dans une pièce résistante aux intrusions.

9.4.3. Bunkers/casemates en béton

Un bunker ou une casemate en béton armé peut servir à l'entreposage de petits conteneurs et de conteneurs de taille moyenne et de grande taille, en fonction de ses dimensions. Un bunker relativement petit d'une capacité de quelques mètres cubes muni d'un lourd couvercle peut être un système peu coûteux mais sécurisé pour l'entreposage de colis de petite taille et de taille moyenne.

Une casemate plus grande avec un lourd couvercle peut contenir des colis de grande taille, ainsi que des colis de petite taille et de taille moyenne, et pourrait servir à l'entreposage d'un grand nombre de sources (fig. 65). Si nécessaire, ces bunkers pourraient être facilement convertis en installations d'entreposage à long terme en scellant l'entrée avec du béton armé, nécessitant une surveillance minimale.

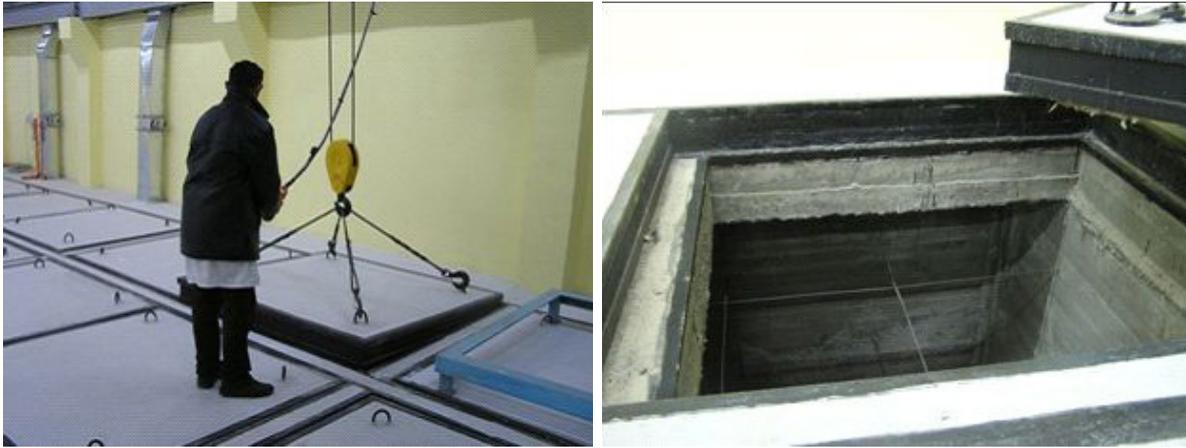


FIG. 65. Casemate de béton pour l'entreposage de sources radioactives scellées retirées du service.

9.4.4. Comparaison des systèmes d'entreposage sur site

Les installations d'entreposage décrites ci-dessus sont comparées en fonction de diverses caractéristiques présentées au tableau 7 [15]. Celles-ci représentent les plus importantes pour les différentes options d'entreposage, et permettent à chaque utilisateur de choisir simplement une option appropriée.

TABLEAU 7. COMPARAISON DES SYSTÈMES D'ENTREPOSAGE SUR SITE [15]

Type	Coffre-fort	Pièce résistante aux intrusions	Pièce résistante aux intrusions avec coffres-forts	Bunker en béton
Capacité	Faible/moyenne	Grande	Grande	Grande
Coûts	Faibles	Moyens	Moyens	Moyens
Flexibilité (dimensions des conteneurs)	Limitée	Grande	Grande	Grande
Confinement	Bon	Bon	Bon	Bon
Protection radiologique	Moyenne	Bonne	Bonne	Bonne
Sécurité	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne
Facilité d'accès	Bonne	Très bonne	Bonne	Insuffisante
Surveillance nécessaire	Régulière	Régulière	Régulière	Irrégulière

9.4.5. Problèmes rencontrés et enseignements tirés

9.4.5.1. Entreposage non sécurisé et peu sûr

L'entreposage dans des conditions non sécurisées peut conduire à l'accès aux sources radioactives scellées retirées du service (parfois de très haute activité) par le personnel non autorisé, avec des conséquences radiologiques potentiellement graves. La figure 66 présente un exemple de conditions d'entreposage non sécurisées : la tête d'un dispositif de téléthérapie retiré du service (c'est-à-dire la source radioactive) était accessible, juste couverte, dans un couloir d'hôpital.



FIG. 66. Exemple de conditions d'entreposage non sécurisé.

Le démontage d'une source du porte-source n'est pas recommandé sur le site de l'utilisateur ; seul le retrait du porte-source de l'équipement est conseillé. Il est important que l'obturateur soit placé en position verrouillée. Toutefois, seul le personnel formé à l'utilisation de l'équipement particulier devrait tenter d'en retirer le porte-source, car la sûreté de ce dernier pourrait être compromise par le démontage. Le démontage du dispositif de téléthérapie par un personnel non formé peut entraîner une exposition aux rayonnements et des lésions corporelles (voir la figure 67).

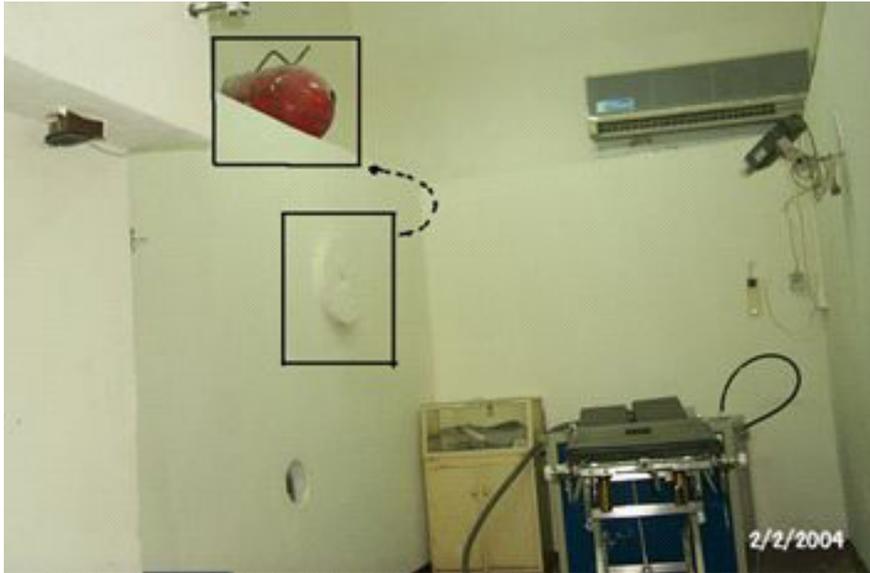


FIG. 67. Dispositif de téléthérapie partiellement démonté (la tête a été coupée alors que le tiroir était dans le dispositif).

Lorsqu'une source est laissée intacte dans l'installation, cela peut conduire à une situation potentiellement dangereuse. Par exemple, une ancienne salle de radiothérapie a été utilisée comme vestiaire/salle de rangement par le personnel dans un hôpital (fig. 68). Les employés n'ont pas reconnu une source radioactive au ^{60}Co laissée entreposée dans cette pièce. Heureusement, l'activité de la source était plutôt faible, donc il n'y a eu aucune exposition importante, bien que le tiroir de source n'ait pas été verrouillé en position d'entreposage.



FIG. 68. Le tiroir contenant une source au ^{60}Co n'a pas été retiré de ce dispositif de téléthérapie.

Dans certains cas, les installations d'entreposage ne sont pas conformes aux prescriptions de sécurité et, par conséquent, des personnes non autorisées peuvent s'introduire dans l'entrepôt et s'emparer de sources ou de matériel de protection (fig. 69).



FIG. 69. Entrepôt de sources au radium rarement et irrégulièrement visité.

9.4.5.2. Conditions d'entreposage inappropriées

Des conditions d'entreposage inappropriées, y compris une forte humidité, des fluctuations de température, peuvent entraîner la dégradation de la source ou du conteneur par corrosion (voir la figure 70) et endommager les étiquettes apposées sur les sources et les conteneurs (voir la figure 71). Il faut veiller à ce que les données relatives à la source ne soient pas perdues et que toutes les étiquettes soient protégées et leurs informations enregistrées lors des opérations de relocalisation.

L'expérience a également montré que les conditions de corrosion, dans une installation d'entreposage, pouvaient entraîner la dégradation du porte-source et une défaillance du mécanisme d'obturation, ce qui peut occasionner des difficultés pour retirer la source.



FIG. 70. Conteneurs corrodés.



FIG. 71. Conteneur de sources dont l'étiquette est dégradée.

9.4.5.3. Défaut de mise en garde contre les rayonnements

Parfois, il n'y a pas de panneau de mise en garde approprié sur l'installation d'entreposage contre la présence d'un danger radiologique (voir la figure 72). Par exemple, les panneaux ne sont pas rédigés dans la langue locale et la population locale ne comprend pas la gravité des dangers. Il conviendrait de noter qu'il arrive parfois que la direction évite de placer des panneaux de mise en garde sur les portes pour ne pas attirer l'attention de personnes qui ne comprennent pas le sens de ces panneaux ou du mot « radioactif » et qui pourraient penser que des marchandises de valeur sont entreposées derrière la porte verrouillée. Cela peut conduire à l'intrusion de personnes non autorisées dans l'installation d'entreposage sur site.



FIG. 72. Bâtiment d'entreposage sans signal ni panneau de mise en garde.

Il y a un risque supplémentaire pour le personnel et le public en général lorsque les niveaux de rayonnement et de contamination ne sont pas régulièrement mesurés.

9.4.5.4. Risque d'incendie

Si les sources radioactives scellées retirées du service sont entreposées avec d'autres matières non radioactives, par exemple des matières inflammables, cela peut provoquer des dommages ou des incendies (voir la figure 73).



FIG. 73. Entreposage inadéquat de sources radioactives scellées retirées du service.

9.5. EXEMPLES D'INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE CENTRALISÉ

Les installations d'entreposage centralisé disponibles dans les États Membres se répartissent principalement en deux catégories : les installations de surface et les installations souterraines, dont certaines étaient à l'origine destinées au stockage définitif des déchets. Une installation d'entreposage à la fois en surface et souterraine pourrait être entièrement ou partiellement construite [61].

L'entreposage souterrain consiste essentiellement à déposer des colis de déchets dans des installations construites à faible profondeur (souterraines), souvent avec une solide fondation de béton et un matériau de remblayage approprié, ce qui permet encore de récupérer les déchets.

L'entreposage en surface fait référence à tout bâtiment ou toute structure en surface destinés spécialement à l'entreposage de colis de déchets. Bien souvent, les entrepôts de surface sont conçus en tenant compte de la nécessité de manipuler de grands volumes de colis de déchets en fûts ou en boîtes. Ils peuvent aller de simples enclos à des installations hautement sophistiquées, avec des structures de protection et des équipements de télémanutention, ainsi que des systèmes de ventilation, de collecte des effluents et de commande automatique.

Dans le passé, les sources de catégorie 1 étaient entreposées temporairement à l'air libre lorsqu'il n'y avait pas d'installation d'entreposage souterraine ou de surface adéquate (fig. 74). Étant donné que les colis de déchets ne sont pas protégés contre l'environnement et que les conditions de sécurité sont inappropriées, cette option d'entreposage est inadéquate et inacceptable au regard des prescriptions modernes de sûreté et de sécurité.



FIG. 74. Entreposage inadéquat de GTR à l'air libre.

9.5.1. Entreposage souterrain

Il existe différentes options pour l'entreposage souterrain des sources radioactives scellées retirées du service. Ces options comprennent l'entreposage à sec, comme dans des puits (fig. 75), des tubes (fig. 76) ou des casemates blindées (fig. 77). Ce type d'entreposage permet un très bon niveau de protection physique et de blindage pour les sources entreposées. Une installation peut avoir besoin d'utiliser plus d'une de ces options en vue d'un entreposage approprié pour toute la gamme de sources retirées du service qu'elle reçoit.



FIG. 75. Préparation et chargement de colis de sources radioactives scellées retirées du service au ^{60}Co dans une installation d'entreposage en puits.



FIG. 76. Entreposage de sources scellées dans des tubes.



FIG. 77. Casemates en béton servant à l'entreposage de boîtes en béton.

Après une période d'entreposage provisoire, il est probable que les conteneurs de déchets seront récupérés pour être encore conditionnés et réemballés avant leur stockage définitif. Les problèmes pratiques à prendre en considération dans le cadre de cette approche comprennent :

- la nécessité de séparer les sources lorsqu'on les met dans l'entrepôt ;
- la production de chaleur, l'activité et les limites de débit de dose pour chaque conteneur et pour l'entrepôt ;
- la nécessité de récupérer, de conditionner et de transporter les sources consolidées dans le futur ;
- la nécessité de s'assurer que le niveau le plus élevé des eaux souterraines se trouve en dessous de la casemate.

9.5.2. Entreposage en surface

Les installations d'entreposage construites pour les sources radioactives scellées retirées du service peuvent être différentes de par leur conception en raison du risque radiologique considéré. Une installation

d'entreposage destinée aux sources de catégories 3 à 5 peut être de construction simple, par exemple un bâtiment érigé sur un socle en béton avec une structure en acier et des tôles ondulées recouvrant les murs et le toit (fig. 78). Il peut aussi s'agir d'une construction de type entrepôt sans aucune disposition pour la manutention des colis et le chauffage ou dans laquelle la ventilation est largement utilisée.



FIG. 78. Installation d'entreposage de déchets de construction légère.

Des entrepôts de construction plus sophistiquée avec toutes les fonctionnalités techniques sont plus appropriés pour l'entreposage de plus longue durée des sources radioactives scellées retirées du service dont les débits de dose de surface sont élevés. Les installations d'entreposage peuvent avoir en place des dispositions pour la manutention des colis, la protection avec du béton (ou équivalent), l'inspection à distance, la ventilation, le contrôle de la température, la collecte des effluents et la préparation des surfaces des bâtiments pour faciliter la décontamination. La norme de construction minimale pour ces entrepôts est que le blindage doit être adéquat, le sol solide et les dispositions de sûreté appropriées pour l'inspection des colis de déchets (fig. 79).



FIG. 79. Installation d'entreposage de déchets de construction solide.

Un autre type d'entreposage de zone consiste à mettre les sources radioactives scellées retirées du service dans des conteneurs de grandes dimensions qui permettent au moins d'assurer une meilleure protection physique des colis entreposés. La figure 80 présente un exemple d'installation d'entreposage simple de zone (conteneurs d'expédition/d'entreposage ISO).



FIG. 80. Grands conteneurs ISO.

On peut mettre le conteneur dans un endroit approprié, c'est-à-dire sur un site de collecte centralisé, dans un petit centre de recherche nucléaire, une centrale nucléaire ou une zone gardée sous contrôle gouvernemental. En fonction de leurs dimensions, on peut entreposer entre 40 et 70 conteneurs de 200 L dans cet espace. Plus tard, lorsqu'un dépôt sera disponible, les conteneurs peuvent être transportés directement sans passer par des étapes de rechargement.

Il est important de s'assurer qu'on pourra, à la fin de la période d'entreposage, identifier et récupérer les sources conditionnées et les transporter dans l'installation de stockage définitif. Les colis doivent être empilés de manière systématique pour permettre d'y avoir accès et de les récupérer facilement en cas de besoin, en prévoyant qu'un chariot élévateur ou une grue doit pouvoir accéder à tous les emplacements à tout moment pour récupérer n'importe quel colis.

9.5.3. Problèmes rencontrés et enseignements tirés

9.5.3.1. Entreposage souterrain

Les entrepôts souterrains (forages peu profonds et casemates) sont utilisés depuis de nombreuses années pour l'entreposage des sources radioactives scellées retirées du service dans de nombreux États Membres. Ils offrent généralement des niveaux de protection et de sécurité plus élevés. Toutefois, certains États Membres ont changé d'avis sur cette option d'entreposage. À l'origine, certaines installations étaient destinées au stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service et la récupérabilité des sources n'avait pas été prise en compte. Aujourd'hui, le coût de récupération de ces sources, ajouté au risque associé, a montré que cette option n'est pas judicieuse, en particulier pour l'entreposage à long terme des sources radioactives scellées retirées du service (conditionnées ou non). L'entreposage souterrain peut être envisagé lorsque la durée d'entreposage est très courte et que les conditions climatiques sont favorables (climats secs), loin des zones habitées.

9.5.3.2. *Entreposage en surface*

Emplacement de l'installation d'entreposage

Certaines installations d'entreposage étaient situées dans des zones présentant un risque potentiel d'inondation (zone de faible altitude). Cela a entraîné la dégradation des conteneurs de sources radioactives scellées retirées du service.

Dans certains cas, les installations d'entreposage ont été construites trop près de la lisière du site, ce qui limite le débit de dose des sources retirées du service entreposées et/ou nécessite une protection supplémentaire à l'intérieur de l'installation. Cela limite également la manutention des sources de haute activité à proximité de l'installation. Dans d'autres cas, des installations d'entreposage semblaient situées trop près des frontières nationales en raison de changements politiques qui ont conduit à la création de nouveaux États indépendants.

En plus des aspects techniques et politiques à prendre en compte dans le choix des sites d'entreposage, il y a les questions liées à l'acceptation de ces installations par la population locale. L'acceptation de l'installation et des plans joue un rôle majeur et peut avoir une influence notable sur le plan technique.

Caractéristiques de conception

Conditions environnementales d'entreposage

L'expérience montre que dans certaines installations, les colis de déchets contenant des sources radioactives scellées retirées du service peuvent être entreposés pendant des dizaines d'années sans aucune dégradation, alors que d'autres colis de déchets se sont dégradés au cours de la même période dans d'autres installations après un certain temps d'entreposage. La dégradation des colis de déchets au fil du temps devient une question extrêmement importante, en particulier lorsque la durée d'entreposage doit être prolongée.

L'expérience montre aussi que la longévité des colis dépend très largement des conditions atmosphériques prévalant à l'intérieur de l'installation d'entreposage. En fonction du climat, des systèmes de contrôle de la qualité de l'air pourraient être installés à l'intérieur. Un équipement de refroidissement ou de déshumidification pourrait être installé pour éviter ou réduire au minimum la corrosion/dégradation externe du conteneur de déchets. Lors de la conception, il faudra tenir compte des conditions prévalant lorsque l'installation est pleine ou à moitié pleine : les conditions d'aération, de circulation de l'air et d'humidité peuvent être très différentes selon que l'installation est pleine ou non.

Les défauts des colis de sources radioactives scellées retirées du service pendant l'entreposage sont parfois dus à un endommagement mécanique du conteneur durant la manutention. Ceux-ci allaient de rayures sur la peinture qui accéléreraient la corrosion du matériau du conteneur à la dégradation de celui-ci. Les défauts des conteneurs se manifestent généralement tôt, et c'est une bonne raison de séparer les sources scellées avant la date de conditionnement. Cela permet d'éviter des problèmes systématiques d'intégrité des conteneurs. Plus la durée d'entreposage est longue, plus ces défauts sont probables sous l'action de facteurs internes ou externes.

L'expérience montre également que de nombreux conteneurs conçus pour le transport de sources ne conviennent pas à un entreposage prolongé. Si le Règlement de transport ne constitue pas une préoccupation immédiate, c'est-à-dire pour un entreposage prolongé, il faudrait envisager d'autres solutions d'entreposage moins coûteuses pour les conteneurs.

L'expérience a également montré que la conception de l'installation d'entreposage devrait permettre une certaine flexibilité, des modifications et une extension, en particulier lorsque les options de stockage définitif (y compris les critères d'acceptation des déchets) ne sont pas définitives et que la durée d'entreposage doit être prolongée. À cet égard, il est conseillé de concevoir et de construire des installations d'entreposage modulaires extensibles, qui peuvent être agrandies si nécessaire. Il en existe déjà dans certains pays, dont le Royaume-Uni et la Slovaquie.

Les petits conteneurs de sources sont généralement empilés pour augmenter la capacité des bâtiments d'entreposage. Les sources plus anciennes étaient souvent disposées dans des conteneurs non standard, qui ne remplissaient pas souvent les conditions requises pour l'empilage. Il est pratique de mettre ces colis de forme irrégulière dans des suremballages standard (temporaires) pour faciliter l'empilage et ainsi augmenter l'efficacité de l'entreposage.

Diverses activités opérationnelles d'entreposage ou des écoulements d'eau dans les installations d'entreposage ont donné lieu à l'apparition de petites quantités de déchets radioactifs liquides secondaires au niveau d'activité généralement très faible. Cela confirme la nécessité d'installer un système approprié de collecte et de traitement de ces déchets. De même, de petites quantités de déchets solides radioactifs ont été découvertes à la suite d'activités de contrôle (par exemple recherche de contaminations superficielle des colis, des murs intérieurs et du sol) et d'activités de manutention (par exemple des vêtements de protection). Des mesures doivent être proposées dans la conception pour les recueillir et les traiter.

Récupérabilité

Même avec une évaluation minutieuse, on ne peut exclure la défaillance de colis ou groupes de colis pendant l'entreposage. Dans les premières périodes d'exploitation, les sources radioactives scellées retirées du service étaient placées dans des puits ou des bunkers en béton qui étaient ensuite remplis de sable puis recouverts de béton. L'inspection de ces sources était simplement impossible. Cela a considérablement compliqué leur processus de récupération, et le fait qu'on a ajouté du sable a considérablement augmenté le volume de déchets contaminés par la radioactivité à mettre dans une installation de stockage définitif. Cette pratique n'est considérée comme appropriée, ni pour l'entreposage à court terme, ni pour l'entreposage à long terme.

Maintenance

Des défaillances ont parfois été observées dans le passé dans les structures des bâtiments d'entreposage. Elles étaient dues à l'utilisation de matériaux de construction aux propriétés de vieillissement inappropriées, l'absence de contrôle de qualité, une mauvaise disposition statique du bâtiment, la sous-estimation des propriétés de tassement des structures ou du sous-sol, etc. Le remplacement de ces structures défaillantes est difficile, coûteux et peut nécessiter le transfert temporaire des conteneurs de déchets à un autre endroit. L'expérience montre que la conception, de même que les matériaux et les techniques de construction des installations d'entreposage, doivent être de grande qualité afin de réduire la nécessité de ces opérations. Pendant l'exploitation de l'installation d'entreposage, ses structures devraient être rigoureusement inspectées et le tassement régulièrement mesuré.

Les mesures de contrôle peuvent inclure des évaluations de la structure et de la fondation ainsi que des inspections régulières, et doivent être planifiées à l'avance. D'autres aspects importants à surveiller sont l'opérabilité des équipements de refroidissement là où sont entreposées des sources produisant de la chaleur et celle des instruments de surveillance. Presque tout l'espace des installations d'entreposage est souvent occupé par de conteneurs, ce qui rend difficile la recherche des problèmes.

D'autres aspects importants à surveiller comprennent l'opérabilité aussi bien des équipements de refroidissement là où des sources calogènes sont entreposées, que des instruments de surveillance.

Accès à l'entrepôt et aux colis

Certaines installations d'entreposage anciennes ont été conçues et construites avec le même accès pour le personnel d'exploitation et les véhicules de transport de déchets radioactifs. Cela a entraîné certains accidents et enfreint les règles de radioprotection. Compte tenu de cet enseignement, l'installation d'entreposage devrait avoir une double entrée facile d'accès.

Elle doit être conçue de manière à faciliter l'accès à tous les colis de déchets. Cela est très important pour permettre de placer facilement les conteneurs, mais aussi de contrôler et d'inspecter régulièrement les colis.

Communication

De nombreuses installations d'entreposage sont situées à l'écart d'autres installations nucléaires en exploitation et sont souvent visitées par une seule personne, ce qui souligne la nécessité de communiquer. Dans la conception de l'installation, un niveau approprié de communication interne devrait être assuré entre tout membre du personnel qui y travaille et la salle de contrôle centrale.

Procédures d'exploitation

Inspection des colis

Alors que les pratiques passées n'ont pas toujours permis le contrôle périodique des colis de sources radioactives scellées retirées du service en entreposage, des inspections et un contrôle du contenu de l'installation d'entreposage sont désormais requis, à moins que les colis ne soient soumis à un système de gestion complet (anciennement l'assurance de la qualité) dès leur emballage.

Les conteneurs doivent permettre la manutention, la surveillance, l'inspection et le reconditionnement appropriés des sources. L'empilement dans des agencements tels que des colonnes facilite l'accès et la manutention et permet l'inspection. Les engins de manutention et de levage doivent être inspectés et contrôlés, car ils sont tout aussi sensibles à la corrosion que les conteneurs de déchets eux-mêmes. Un financement et un personnel suffisants doivent être disponibles à cette fin.

Le hangar d'entreposage est généralement rempli de l'arrière vers l'avant. Au moment de la récupération des conteneurs, un couloir ou une porte arrière peut permettre de récupérer les conteneurs plus anciens en premier. Sinon, il faut vider tout le hangar pour atteindre les conteneurs les plus anciens.

Il a été observé que la poussière s'accumulait à l'intérieur de l'installation d'entreposage, ce qui peut compliquer l'accès aux colis et nécessiter des opérations de nettoyage qui peuvent être coûteuses en termes de protection radiologique.

Surveillance de l'environnement

Malgré les efforts déployés pendant la conception et l'exploitation des installations d'entreposage pour rendre leurs structures étanches, des infiltrations d'eau ont été observées dans ces installations. Beaucoup d'efforts ont été faits pour déterminer l'origine de ces infiltrations. Un vaste programme de surveillance des eaux souterraines s'avère nécessaire pour identifier les rejets imprévus de déchets enfouis, par exemple dans du béton. Dans d'autres cas, cela a montré que certaines de ces installations fonctionnaient bien après plusieurs décennies.

10. CONDITIONNEMENT

Le glossaire de sûreté de l'AIEA [1] définit le conditionnement, comme étant les « [o]pérations visant à constituer un colis de déchets pouvant être manipulé, transporté et entreposé et/ou stocké définitivement. Le conditionnement peut consister à convertir les déchets en une forme solide, à les enfermer dans des conteneurs (encapsulation) et, le cas échéant, à mettre en place un suremballage ».

Le conditionnement des sources radioactives scellées retirées du service assure le confinement des matières radioactives, renforce le confinement de celles qui fuient, fournit une protection suffisante contre les rayonnements, réduit le volume d'entreposage/de stockage définitif en permettant de rassembler plusieurs sources dans un seul conteneur d'entreposage/de stockage définitif, facilite les opérations de transport et contribue aussi à la sûreté et à la sécurité.

La capacité d'une organisation à conditionner les sources retirées du service dépend, en partie, des paramètres des sources scellées, du stade final, du processus de conditionnement adopté ainsi que des ressources et des matériaux disponibles.

10.1. IMPACT DES PRESCRIPTIONS D'ACCEPTATION DES COLIS

Le conditionnement optimal d'une source retirée du service donne un colis conforme à toutes les prescriptions de transport, de rapatriement, d'entreposage et/ou de stockage définitif, et permet de le manipuler en temps voulu. Ces prescriptions peuvent se chevaucher, être différentes, voire faire carrément défaut. Dans tous les cas, la personne chargée de conditionner les sources doit s'assurer que les colis sont pleinement conformes aux meilleures pratiques d'emballage et à l'expérience de l'État Membre. Il faudrait consulter l'organisme de réglementation et les organisations qui exploitent ou envisagent d'exploiter des services de transport et des installations d'entreposage et de stockage définitif pour décider des types de conditionnement nécessaires.

Les critères d'acceptation des déchets couvrent normalement un large éventail de paramètres physiques, chimiques et radiologiques essentiels à la sûreté et à l'efficacité des colis de déchets. Certains aspects à prendre en considération pour les critères d'acceptation des déchets sont présentés à la section 9 pour l'entreposage des sources radioactives scellées retirées du service et à la section 12 pour leur stockage définitif. Le Règlement de transport de l'AIEA [47] définit un ensemble de critères qui se chevauchent pour le transport des colis de déchets du lieu de production ou d'utilisation à une installation d'entreposage et/ou de celle-ci à une installation de stockage définitif. Ces critères comprennent notamment le débit de dose en surface, les limites de contamination de surface, le poids, la taille, l'activité totale et les prescriptions d'intégrité structurelle. Étant donné que certains colis, de par leur conception, ont une durée de vie limitée à l'extérieur d'une installation de stockage définitif, les critères d'acceptation des déchets sont considérés comme importants pour garantir qu'un colis de déchets peut encore être récupéré et transporté en sûreté après l'entreposage.

Dans les conditions d'entreposage en attendant le stockage définitif, le colis de sources radioactives scellées retirées du service doit conserver son intégrité physique et chimique. Il peut s'avérer nécessaire de retirer les sources de leurs conteneurs d'expédition/d'entreposage d'origine pour les reconditionner et les réemballer afin de se conformer aux prescriptions d'acceptation des déchets d'une installation d'entreposage à long terme. Le responsable de l'installation d'entreposage peut refuser d'accepter des colis non conformes aux critères d'acceptation des déchets définis par la licence de l'opérateur. À l'heure actuelle, les colis de déchets de sources retirées du service ne sont confectionnés que pour l'entreposage dans la plupart des pays, car il n'y a pas d'installation de stockage définitif.

En plus des critères d'acceptation des déchets pour les installations d'entreposage et de stockage définitif, le potentiel de recyclage/réutilisation et le rapatriement des sources peuvent également pousser à introduire aussi des prescriptions pour l'emballage et la certification. Les États Membres qui conditionnent activement les sources pour l'entreposage, qu'il y ait ou non actuellement une filière de stockage définitif

identifiée, devraient veiller à ce que toutes les mesures prises dans le processus de conditionnement soient réversibles, si nécessaire, pour permettre de se conformer aux futures prescriptions d'emballage. Pour les sources à rapatrier, les prescriptions de l'État Membre de destination peuvent sembler trop restrictives ou compliquées, mais le respect de ces exigences est essentiel pour le rapatriement.

10.2. SPÉCIFICATIONS DES COLIS DE DÉCHETS

Les spécifications des colis de déchets sont un ensemble de paramètres quantitatifs qui doivent être respectés lors de la confection d'un colis de sources radioactives scellées retirées du service avant l'entreposage ou le stockage définitif [64]. Elles visent à contrôler les caractéristiques radiologiques, physiques et chimiques du colis qui doit être confectionné, traité ou accepté d'un autre organisme. Les spécifications relatives aux déchets mettent généralement l'accent sur la performance des colis ou le contrôle des processus opérationnels des installations et peuvent être utilisées comme moyen contractuel pour contrôler les opérations de conditionnement sous-traitées. Les spécifications relatives aux colis de déchets, comme les critères d'acceptation des déchets, devraient tenir compte des paramètres prévus de l'installation d'entreposage/de stockage définitif visée ainsi que du règlement de transport, et incorporer les paramètres pertinents de ces critères, ou les remplacer lorsque ceux-ci n'ont pas été élaborés.

Alors que les critères d'acceptation des déchets, généralement propres à l'installation ou au site, peuvent englober de nombreux types différents de colis, les spécifications relatives aux colis de déchets concernent un type particulier d'emballage et servent à définir les caractéristiques et les attributs d'un colis de déchets. Les spécifications définitives des colis de déchets devraient être en harmonie avec les valeurs utilisées dans les évaluations de la sûreté des activités, en particulier les évaluations mettant en jeu un entreposage prolongé et le stockage définitif.

Une faiblesse potentielle des systèmes de conditionnement et d'entreposage des sources retirées du service est la préservation des informations sur les matières radioactives conditionnées. Il importe donc de donner toutes les informations pertinentes à la fois à l'extérieur et à l'intérieur du colis, en utilisant un matériau suffisamment durable disponible (acier inoxydable, aluminium, laiton ou cuivre, avec des données poinçonnées ou gravées). Il est essentiel de relier un numéro d'identification unique aux relevés archivés et au colis de déchets.

Les informations suivantes devraient apparaître sur les étiquettes :

Conteneur d'encapsulation	Numéro d'identification unique Isotope Activité Date de chargement
Boîtier provisoire (si l'opération est interrompue)	Numéro d'identification unique Étiquettes et signaux approuvés de mise en garde contre les rayonnements Isotopes et activité totale
Colis de déchets	Numéro d'identification unique Étiquettes et signaux approuvés de mise en garde contre les rayonnements Isotopes et activité totale Date de conditionnement Débit de dose (en surface et à 1 m)

Le conditionnement des sources d'un nucléide par conteneur simplifie les relevés et facilite les étapes de gestion ultérieures.

10.3. PRESCRIPTIONS RELATIVES À LA CONCEPTION DES INSTALLATIONS DE CONDITIONNEMENT

Les prescriptions relatives aux installations de conditionnement varieront en fonction du volume et des caractéristiques des sources telles que la nature des radionucléides, l'activité, la composition chimique, la forme physique, le poids et les dimensions de la source.

Les usines de conditionnement peuvent être des installations autonomes ou mobiles et peuvent être adjacentes aux installations d'entreposage afin de réduire la nécessité de transporter les colis entre les sites de conditionnement et d'entreposage. Dans les deux cas, elles devraient être situées dans des zones radiologiques bien définies.

Les installations de conditionnement des sources radioactives scellées retirées du service devraient avoir des capacités techniques suffisantes pour conditionner différentes sources en tenant compte des incertitudes liées à la disponibilité d'installations de stockage définitif. Ces capacités peuvent comprendre l'équipement nécessaire pour la caractérisation de ces sources (détecteurs de rayonnement, compteurs et spectromètres) et pour le démantèlement des dispositifs et autres structures connexes telles que les cellules chaudes. Si l'activité des sources est suffisamment faible, elles peuvent être manipulées en sûreté dans une boîte à gants ou une sorbonne grâce à un bouclier et des outils appropriés (voir section 8.2).

Voici les aspects à prendre en considération lors de la conception d'une installation de conditionnement :

- a) la protection contre l'exposition aux rayonnements (par blindage et confinement) ;
- b) le contrôle de l'accès aux zones de conditionnement et d'entreposage des sources et le contrôle des déplacements entre les zones de rayonnement et celles de contamination ;
- c) la récupération des paquets entreposés ;
- d) le contrôle des stocks : archives des modèles de source et de conteneur ;
- e) l'inspection des colis de sources radioactives scellées retirées du service ;
- f) la gestion des colis de sources radioactives scellées retirées du service qui ne répondent pas aux spécifications ;
- g) le contrôle des effluents liquides et gazeux ;
- h) la ventilation, et la filtration des matières radioactives rejetées dans l'air ;
- i) les travaux de maintenance et le déclassé ultérieur ;
- j) la protection contre les incendies et la prévention des explosions ;
- k) la prévention de la criticité et le contrôle des garanties ;
- l) les contrôles en vue de la sécurité physique.

10.4. PRESCRIPTIONS RELATIVES À L'EXPLOITATION DES INSTALLATIONS DE CONDITIONNEMENT

Le conditionnement des sources retirées du service est une activité soumise à l'obtention d'une licence. Un rapport d'analyse de la sûreté est requis dans le cadre de la demande de licence. Celle-ci doit définir l'ampleur des opérations de conditionnement, ainsi que toutes les prescriptions particulières à respecter.

Les procédures techniques détaillées doivent être définies en mettant l'accent sur la capacité effective de chaque pays. Cette définition donne l'assurance que les prescriptions d'acceptation peuvent être satisfaites pendant la conception et la construction de l'installation, l'élaboration des procédures techniques et le conditionnement proprement dit.

Les aspects de santé et de sûreté doivent être couverts dans les procédures opérationnelles relatives au conditionnement des sources. Il est important que le processus de conditionnement soit bien planifié, préparé et étayé. Les expositions, les rejets radioactifs et les niveaux de contamination doivent être

maintenus en dessous des limites autorisées. Certaines opérations, telles que le démontage, l'encapsulation, le soudage télécommandé, les tests de soudure et les tests d'étanchéité des sources doivent être effectuées dans des zones contrôlées conçues à cet effet (cellules chaudes, boîtes à gants, etc.). D'autres procédures peuvent être élaborées en fonction des conditions existantes, mais elles doivent être conformes aux mêmes prescriptions de sûreté. Toutes les procédures doivent être testées et approuvées avant d'être appliquées.

Les débits de dose à la surface des sources retirées du service conditionnées devraient être acceptables pour le transport et l'entreposage. Si la zone ou l'installation de conditionnement est située à une certaine distance de l'entrepôt (comme c'est généralement le cas), l'installation doit disposer d'équipements de levage, de transfert et de transport appropriés en tenant dûment compte des prescriptions de sûreté et d'entretien.

10.5. SÉLECTION D'UNE MÉTHODE DE CONDITIONNEMENT

10.5.1. Critères de sélection

Le choix d'une méthode de conditionnement [52] dépend d'un grand nombre de facteurs techniques et non techniques. Les paramètres techniques suivants et certains autres facteurs doivent être pris en compte lors de la planification d'une opération de conditionnement de sources retirées du service :

- les caractéristiques des sources (type de rayonnement ionisant, activité, période, toxicité chimique) ;
- la forme physique et chimique des matières radioactives ;
- le nombre, la taille et l'état physique des sources retirées du service ;
- la conformité aux règlements (par exemple les prescriptions d'acceptation pour l'entreposage et/ou le stockage définitif, la protection contre les rayonnements et les prescriptions de sûreté) ;
- la période d'entreposage, les conditions d'entreposage et l'emplacement d'une installation d'entreposage/de stockage définitif ;
- la production de chaleur due à la matière de la source et/ou à la méthode de conditionnement ;
- les technologies de conditionnement éprouvées ;
- le coût et les ressources (équipement, main-d'œuvre et matériels nécessaires au conditionnement).

L'importance relative des facteurs susmentionnés dépendra de la situation particulière du pays.

10.5.2. Sélection des matériaux pour les colis de déchets

Le choix des matériaux utilisés pour le conditionnement est très important, car la capsule de la source pourrait être endommagée en raison de conditions environnementales externes ou d'attaques chimiques ou physiques de l'intérieur et de l'extérieur. Le processus de conditionnement doit tenir compte de divers problèmes potentiels afin de réduire au minimum les risques de fuites.

La source scellée et son conteneur devraient être compatibles. En fonction des caractéristiques de la source et de la méthode de manutention, de transport et d'entreposage, il se peut que le conteneur doive aussi fournir une protection contre les rayonnements directs. Lors du choix des matériaux pour le conteneur et la finition de sa surface extérieure, il faudrait tenir compte de la nécessité de pouvoir la décontaminer facilement. Si un conteneur n'est pas initialement conçu pour répondre aux critères d'acceptation pertinents pour le transport, l'entreposage ou le stockage définitif, il faudra un autre conteneur ou un emballage supplémentaire pour répondre à ces critères. Il faudrait veiller à tenir compte de la compatibilité du colis de sources radioactives scellées retirées du service et du suremballage avec les critères d'acceptation des déchets.

Un conditionnement inapproprié pourrait entraîner le rejet de la matière radioactive d'une source retirée du service dans l'environnement sous forme de :

- produits gazeux (par exemple radon) ;
- liquides (solutions aqueuses, lixiviats, etc.) ;
- particules solides (poudres, aérosols, etc.).

Le matériau d'encapsulation est sélectionné pour fournir l'assurance d'un confinement approprié et efficace de la matière radioactive. Par ailleurs, les matériaux barrières choisis devraient être durables et capables de résister aux contraintes mécaniques et aux autres effets environnementaux.

Il faudra donc tenir compte des aspects suivants afin de sélectionner des matériaux appropriés pour ces barrières :

- la force mécanique ;
- la dégradation des matériaux (la durée de vie d'une barrière doit au moins dépasser la période d'entreposage prévue dans la zone d'entreposage ou la période optimale couverte par le plan d'assurance de la qualité) ;
- les effets des rayonnements sur le matériau barrière ;
- la résistance à la corrosion et au feu ;
- l'imperméabilité à l'eau et à l'humidité ;
- les produits de désintégration radioactive, en particulier sous forme gazeuse
- la sécurité de la source.

10.6. MÉTHODES DE CONDITIONNEMENT

La stratégie générale de gestion des sources retirées du service est décrite à la section 6, où il est indiqué que lorsqu'il n'y a pas d'option de recyclage/réutilisation, de retour au fournisseur/fabricant, mais qu'un site de stockage définitif est disponible, les sources retirées du service doivent être stockées définitivement comme déchets radioactifs conformément aux prescriptions applicables. Si aucune des options susmentionnées n'est possible, alors elles devront être entreposées jusqu'à ce qu'il y ait une option de stockage définitif appropriée. Il faudrait alors les conditionner pour confectionner des colis conformes aux prescriptions d'acceptation pertinentes.

10.6.1. Sources retirées du service contenant des radionucléides à courte période

Dans le cas d'un entreposage de type puits ou tube (voir la section 9.5.1), les sources radioactives scellées retirées du service contenant des radionucléides à courte période ont été placées dans un tiroir en acier inoxydable (de 37 mm de diamètre sur 500 mm de longueur) muni de deux fiches de protection appropriées aux extrémités. Ensuite, le tiroir a été scellé par un système de soudage TIG et testé contre les fuites par la méthode d'essai à la bulle. Pour le chargement du tiroir dans les tubes d'entreposage, un conteneur de transport blindé à chargement par le bas a été utilisé et le tiroir pouvait être abaissé et soulevé dans la position d'entreposage par télémanutention. Avant la procédure de chargement, le conteneur de transport est aligné sur le tube à l'aide d'un faux tiroir (figure 81). Les sources sont conservées dans un certain nombre de conteneurs de volume relativement faible, et chaque conteneur contenant chacun plusieurs sources. La récupération de chaque conteneur est relativement aisée.



FIG. 81. Partie interne rotative d'un conteneur de chargement/déchargement de type B (U).

La partie rotative d'un conteneur peut habituellement avoir deux ou trois vrais tiroirs et un faux tiroir. L'avantage de cette méthode est que ce système peut être utilisé comme tiroir standard pour des sources radioactives scellées retirées du service de différentes tailles. L'activité d'un tiroir dépend de la protection fournie par le conteneur de transport. Les installations de ce type ont été conçues pour les sources radioactives scellées retirées du service de faible comme de haute activité.

En Inde, les conteneurs de sources conçus pour le stockage définitif sont placés dans des puits revêtus. Un puits revêtu est un cylindre en acier revêtu de béton ouvert dans sa partie supérieure, d'une profondeur d'environ 4 m. La surface extérieure est recouverte de béton et traitée avec un matériau étanche. L'espace vide dans le puits revêtu est rempli de mortier de ciment. L'orifice du puits est scellé avec du béton puis imperméabilisé. La figure 82 présente un puits revêtu ordinaire.

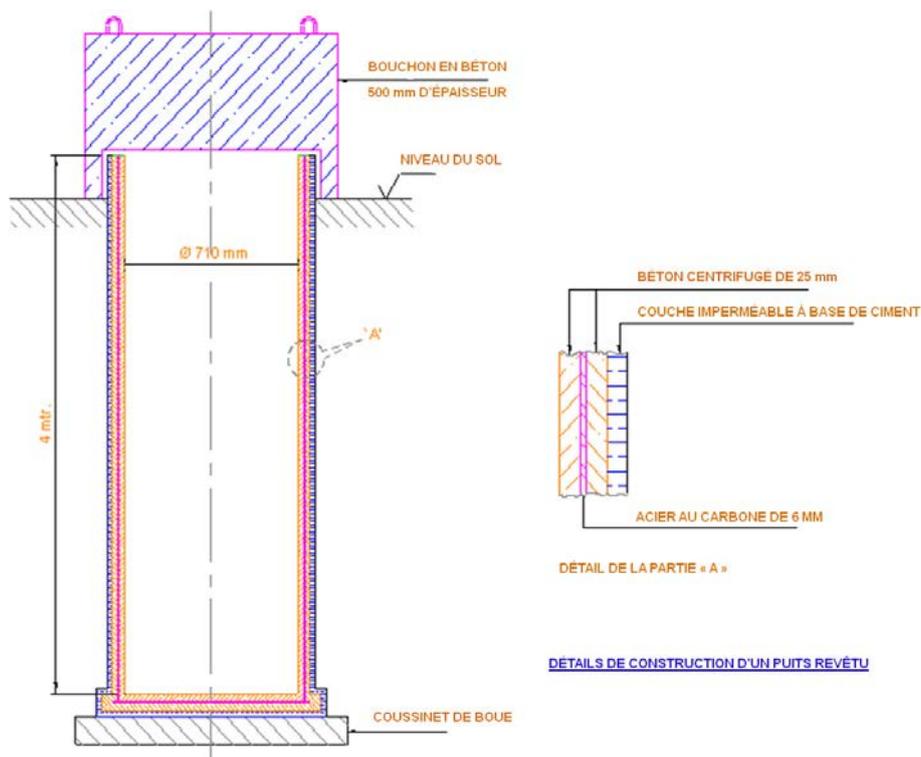


FIG. 82. Représentation schématique d'un puits revêtu ordinaire.

10.6.2. Sources retirées du service contenant des radionucléides à longue vie

Les radio-isotopes à longue vie les plus courants contenus dans les sources radioactives scellées sont le ^{238}Pu , le ^{239}Pu , le ^{237}Np , l' ^{241}Am , le ^{226}Ra (émetteurs alpha) ainsi que le ^{14}C et le ^{63}Ni (émetteurs bêta). Les détecteurs de fumée, les paratonnerres et les éliminateurs d'électricité statique sont des exemples de sources retirées du service contenant des radionucléides à longue vie pouvant être manipulées sans protection. En revanche, il faut une protection en plomb pour la manutention sûre des sources de curiethérapie au ^{226}Ra et au ^{137}Cs .

10.6.2.1. Sources scellées retirées du service contenant du radium et d'autres radionucléides à longue vie

Il existe une méthode bien éprouvée de conditionnement des sources de curiethérapie au radium (figures 83 à 86) et d'autres sources retirées du service à longue vie en vue de l'entreposage. Pour les conditionner, on les encapsule (pour les sortir plus facilement de l'entrepôt en vue de leur stockage définitif dans un dépôt géologique), puis les capsules soudées sont placées dans un conteneur en plomb pour confinement (en cas d'entreposage à long terme suivi de transport), lequel conteneur est enfin placé dans un fût en acier doux de 200 L à revêtement en béton [16, 18]. Le béton sert principalement à assurer la protection physique et la sécurité des sources. Le poids minimum des colis est généralement d'environ 350 kg et leur manutention et leur transport nécessitent un équipement mécanique, par exemple un chariot élévateur. Ce genre de conditionnement empêche la perte de confinement des matières radioactives ainsi que l'enlèvement non autorisé des sources en raison du volume, du poids et de la robustesse du colis.

La capsule utilisée pour l'encapsulation des sources à longue période est un tube en acier inoxydable muni d'un couvercle soudé à une extrémité (fig. 83). Certaines capsules doivent être préparées de cette manière à l'avance afin qu'il y en ait suffisamment pour encapsuler toutes les sources disponibles. Après avoir mis les sources dans la capsule en acier inoxydable, on soude un second couvercle à l'autre extrémité.



FIG. 83. Capsules ordinaires en acier inoxydable.



FIG. 84. Encapsulation de sources au radium.



FIG. 85. Enceintes en plomb pour entreposage à long terme.

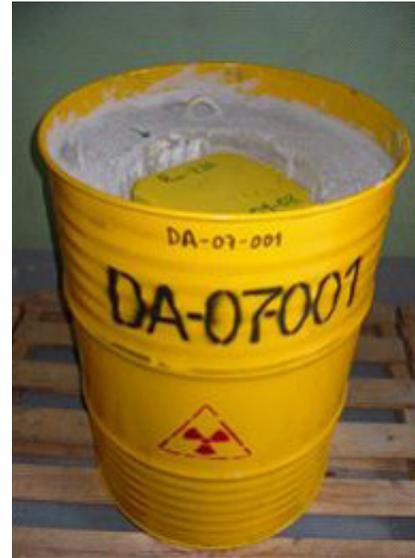


FIG. 86. Colis de sources au radium avant fermeture.

Des méthodes légèrement différentes et particulières de conditionnement de sources au radium et d'autres sources à longue période ont été élaborées et appliquées en ex-URSS et en Europe de l'Est [65].

Toutes les informations pertinentes sur le stock conditionné – radio-isotope, date de conditionnement, nombre de capsules, activité totale, etc. – doivent être enregistrées par plusieurs moyens (par exemple copie papier, fichiers électroniques, plaques métalliques gravées fixées sur les colis) et conservées par l'autorité compétente.

10.6.2.2. Détecteurs de fumée

Les détecteurs de fumée constituent un cas particulier dans cette catégorie, car pris individuellement, ils sont souvent exemptés du contrôle réglementaire et, par conséquent, leur stockage définitif dans les décharges ordinaires est autorisé pour chaque source. Cependant, compte tenu du grand nombre de ces dispositifs distribués dans un pays et de la longue période des sources, on préfère de plus en plus collecter, enlever (fig. 87) et rassembler celles-ci pour le conditionnement puis l'entreposage à long terme [18].

Une option de conditionnement appropriée pour les sources collectées pourrait être de les mettre dans des boîtes en acier inoxydable, qui seront ensuite soudées. Dans de nombreux pays, il existe une limite de concentration de 4 000 Bq/g d'émetteurs alpha pour chaque colis de déchets radioactifs en vue du stockage définitif dans des dépôts en surface ou à faible profondeur [66]. Bien que le soudage de chacune des boîtes en acier inoxydable puisse être une méthode préférée pour retarder ou éliminer le risque de rejet de radon ou d'autres produits de filiation du conteneur entreposé, les futures installations de stockage définitif ou d'entreposage pourraient exiger une vérification visuelle pour identifier chaque source avant l'expédition, ce qui signifie qu'il faudrait envisager d'autres moyens de fermeture interne du conteneur. Dans un État Membre, les feuilles à l' ^{241}Am retirées des détecteurs de fumée ont été emballées dans des boîtes semblables à des pots de peinture, qui ont ensuite été chargées dans des fûts standard de 200 L pour être entreposées en attendant le stockage définitif.



FIG. 87. Centaines de sources retirées de détecteurs de fumée.

10.6.2.3. Paratonnerres

Les paratonnerres sont normalement de grande taille, mais une petite source scellée est logée à l'intérieur du dispositif. On peut les démonter facilement et en retirer la source (figures 41, 88). La procédure de démontage dépend principalement du niveau de contamination des différentes parties du dispositif et de la possibilité technique de retirer les parties radioactives (feuilles ou pastilles) sans qu'il y ait des déchets secondaires. Pour éviter la contamination de l'environnement, les parties démontées (pièces du dispositif, sources, consommables, etc.) sont enfermées dans un sac en plastique qui est transféré dans une boîte à gants. Ce sac est ouvert après la fermeture de la boîte à gants.



FIG. 88. Plaques au ^{226}Ra et à ^{241}Am retirées de paratonnerres.

Les sources (feuilles, bandes ou disques en céramique) retirées du corps de la tige du paratonnerre pourraient être soudées dans des capsules en acier inoxydable comme décrit ci-dessus pour le radium.

10.6.3. Sources de neutrons

La principale différence en ce qui concerne le conditionnement des sources de neutrons est qu'il faut des atténuateurs pour réduire les débits de dose des neutrons en plus de la dose gamma. Dans la pratique, les sources de neutrons, y compris l'Am-Be, le Ra-Be, le Pu-Be, sont généralement placées dans des capsules de forme spéciale, comme indiqué plus haut, lesquelles sont ensuite placées dans des suremballages de tuyaux S-100 ou S-300 comme décrit ci-dessous. Il est important de se rappeler que les sources de neutrons n'utilisent pas toutes le béryllium comme émetteur de neutrons. Le béryllium est certes l'élément le plus couramment utilisé en association avec le nucléide émetteur alpha, mais d'autres éléments comme le lithium, le bore, le fluor et d'autres ont été employés. Le californium 252 aussi a été utilisé dans les sources de neutrons. Ce nucléide, qui se désintègre par fission spontanée, a un taux d'émission de neutrons beaucoup plus élevé que n'importe quelle source de neutrons utilisant des réactions alpha-neutrons pour l'émission de neutrons.

S'agissant des sources de neutrons logées dans des dispositifs, il faudrait suivre les instructions du fabricant ou les consignes d'utilisation pour les retirer. S'il n'y a pas d'instructions ou de consignes, on peut emballer les dispositifs pour les transporter intacts, ou trouver une méthode pour les préparer ou des procédures de démontage. En aucun cas, il ne faut retirer les sources des dispositifs sans instructions ou procédures précises du fabricant du dispositif ou d'une autre source bien informée.

Les sources de neutrons peuvent être conditionnées dans des conteneurs de suremballage de tuyaux de modèles S-300 ou S-100. Ce sont des conteneurs de stockage définitif acceptés dans les installations de stockage opérationnelles qui accueillent des sources de neutrons, et qui sont également certifiés pour utilisation comme conteneurs de transport en vertu du Règlement de transport de l'AIEA.

Ils utilisent un blindage neutronique en polyéthylène haute densité à l'intérieur d'un tuyau en acier inoxydable, ce qui réduit les débits d'équivalent de dose neutronique externe par unité d'activité dans le conteneur. Cela permet de charger un volume d'activité plus élevé dans les conteneurs tout en respectant les limites de débit de dose externe pour l'emballage et le stockage définitif. Ces conteneurs sont disponibles dans le commerce et possèdent une certification internationale en tant que colis de type A.

Le suremballage de tuyaux S-300 est un composant de tuyaux de 30 cm de diamètre maintenu dans un fût de 200 L par un remplissage d'aggloméré ou de contreplaqué et des matériaux de protection interne contre les neutrons. Le composant de tuyaux a une hauteur totale de 70 cm et un diamètre extérieur de 32 cm. Le composant de tuyaux suremballé dans un fût de 200 L pèse 195 kg. Son corps, son couvercle et la bride de son boulon sont en acier inoxydable. Un joint annulaire en caoutchouc butylique ou en éthylène-propylène sert à fermer le composant de tuyaux.

Le conteneur de modèle S-100 (fig. 89) est un composant de tuyaux de 15 cm de diamètre maintenu dans un fût de 200 L au moyen de matériaux de protection contre les neutrons. Le composant de tuyaux a une hauteur totale de 70 cm et un diamètre extérieur de 17 cm. Le composant de tuyaux suremballé dans un fût de 200 L pèse 220 kg. Son corps, son couvercle et la bride de son boulon sont en acier inoxydable.

Les informations pertinentes sur la performance ou l'acquisition peuvent être obtenues auprès du Ministère de l'énergie des États-Unis d'Amérique.



FIG. 89. Conteneur de suremballage de tuyaux S-100.

10.6.4. Sources de haute activité retirées du service

Il n'y a pas beaucoup d'options pour le conditionnement des sources de haute activité retirées du service [16]. Leur manutention et leur conditionnement nécessitent des cellules chaudes et des télémanipulateurs/manipulateurs esclaves. Le retrait des sources des dispositifs n'est pas pratique.

10.6.4.1. Retrait du porte-source de l'équipement

Cette option est considérée comme une mesure temporaire ou une mesure à prendre uniquement dans des circonstances particulières. Par exemple, s'il n'y a pas d'installation blindée pour retirer les sources des porte-sources et que ceux-ci sont trop grands pour être placés dans un conteneur approprié, il n'y aura peut-être pas d'autre possibilité que cette option. Dans ce cas, le conditionnement se limitera à enlever le porte-source (tête de téléthérapie, irradiateur de recherche, etc.) de l'équipement puis à le transporter dans l'installation d'entreposage. C'est ainsi que de nombreuses têtes de téléthérapie et des irradiateurs de recherche ont été conditionnés en raison des caractéristiques de fabrication et des sources. Tous les dispositifs/porte-sources doivent être marqués, étiquetés et contrôlés pour permettre un entreposage à la fois sûr et sécurisé.

10.6.4.2. Emballage du porte-source dans un conteneur d'entreposage

Le recours à des fûts revêtus de béton, ou des caisses en acier ou en béton pour le conditionnement des sources de haute activité dans les porte-sources est une pratique courante. On peut placer le porte-source dans un conteneur standard (fig. 90). En règle générale, un fût de 100 L sera encastré dans un fût de 200 L avec du béton, ou pour les articles plus gros, des fûts de 200 L peuvent être cimentés dans des suremballages plus grands. Les caisses en béton ou en acier sont préférables aux fûts, car elles sont plus faciles à empiler, et le volume et la charge sont beaucoup plus importants (fig. 91).



FIG. 90. Tête de téléthérapie avant son conditionnement dans un fût en métal.



FIG. 91. Dispositifs de téléthérapie avant et après leur conditionnement dans des boîtes métalliques.

Pour permettre de le récupérer en vue du reconditionnement et du stockage définitif ultérieurs, le porte-source est placé dans un « vide », à l'intérieur du conteneur, mais pas enfoui dans du béton solide. Cette méthode fournit une protection suffisante, permet de retenir le poids du colis, réduit le risque d'enlèvement non autorisé, et permet cependant de retirer le porte-source sans qu'il soit nécessaire de casser le béton coulé lorsque d'autres voies d'utilisation deviendront disponibles.

10.6.4.3. Emballage de la source retirée du porte-source

La source peut être retirée du porte-source et placée dans un conteneur approprié. Cette opération est effectuée dans une cellule chaude bien équipée (par exemple avec des manipulateurs maître-esclave). Le démantèlement réduira le volume à la fois pour l'entreposage et le stockage définitif ultérieur. C'est une

option intéressante lorsque le stock de sources est important. La conception du conteneur d'entreposage doit être déterminée par les caractéristiques de la source et les prescriptions de transport. La cellule chaude doit être équipée d'une porte blindée suffisamment grande pour permettre d'y introduire un conteneur d'entreposage blindé. Elle doit être vérifiée pour s'assurer qu'elle n'est pas contaminée avant d'y introduire la source. Il faut un équipement de levage dans la cellule chaude, en particulier pour le démontage des anciens porte-sources, où la source n'était pas destinée à être enlevée.

Le porte-source vide doit être vérifié pour s'assurer qu'il n'est pas contaminé et, s'il est propre, il peut être réutilisé, recyclé ou stocké définitivement. S'il est contaminé, il doit être décontaminé pour atteindre des niveaux acceptables. Une attention particulière s'avère nécessaire si le porte-source est en uranium appauvri.

Un conteneur d'entreposage blindé peut être conçu pour recevoir un certain nombre de sources retirées du service. Lorsqu'il est plein, il peut être placé dans un fût revêtu de béton, similaire à celui de l'option d'encapsulation décrite ci-dessus, pour permettre une certaine protection supplémentaire. Une autre possibilité serait de concevoir un conteneur d'entreposage non blindé qui pourrait accueillir un certain nombre de sources, puis de le mettre dans un entrepôt blindé (par exemple, de type puits).

Toutes les sources de haute activité entreposées, qu'elles soient blindées ou non, devraient être sécurisées pour empêcher des intrus de retirer les sources des conteneurs ou d'enlever tout le conteneur de l'emplacement d'entreposage blindé.

10.7. INSTALLATION DE CELLULES CHAUDES MOBILES DE L'AIEA

L'AIEA a élaboré et entretient une installation mobile de cellules chaudes (figures 92 à 94) à utiliser pour conditionner des sources scellées de haute activité retirées du service. Depuis 2004, elle prête assistance à des États Membres d'Afrique et d'Amérique latine pour le retrait de sources des têtes de téléthérapie médicale, des irradiateurs et pour conditionner des sources isolées de divers blindages.



FIG. 92. Cellule chaude mobile de l'AIEA, entièrement assemblée et prête à l'emploi.

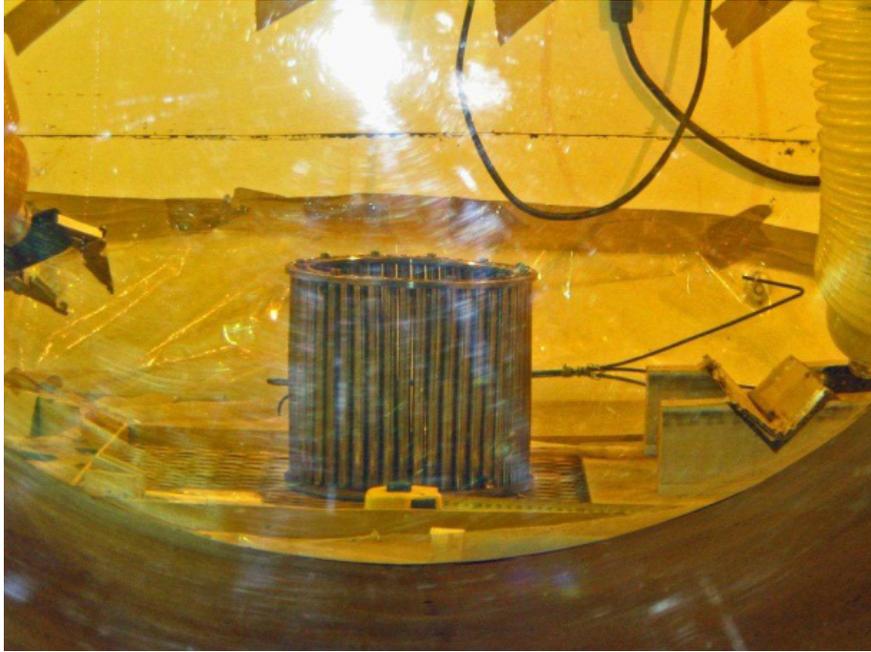


FIG. 93. Panier de sources d'un irradiateur de recherche vu à travers la fenêtre de l'installation de cellules chaudes mobiles de l'AIEA.



FIG. 94. Enceinte d'entreposage à long terme entièrement fixée au port de transfert de l'installation de cellules chaudes mobiles de l'AIEA.

Les capacités offertes de par la conception comprennent le transfert des sources dans un conteneur d'entreposage blindé ou un conteneur de transport, selon le cas, en vue du transfert des stocks de sources pour entreposage, rapatriement ou stockage définitif au plan national. L'installation de cellules chaudes est transportée dans deux conteneurs ISO et comprend tous les outils, équipements et matériaux prévus

pour la mission de récupération. Il ne restera à fournir sur place que l'électricité, la main-d'œuvre locale et du sable pour la protection.

Compte tenu des contraintes de temps, de main-d'œuvre et des dépenses nécessaires, l'utilisation de cette capacité est limitée aux applications sur des sites où il y a un grand nombre de sources de haute activité, où il n'y a pas de capacité de traitement appropriée, où il n'y a pas ou il y a peu d'installations d'entreposage sécurisé. Une fois qu'elle est choisie comme méthode optimale pour le conditionnement d'un stock donné, l'AIEA conclut des contrats avec l'État Membre et son agent d'exécution pour planifier et exécuter les opérations de conditionnement. Son agent transporte ensuite l'installation de cellules chaudes et les conteneurs appropriés jusqu'au site choisi par l'État Membre, se rend sur place et assemble l'installation en utilisant autant que possible la main-d'œuvre et les matériaux locaux, et conditionne les sources des dispositifs assemblés sur le site. À la fin de la mission, l'État Membre devrait, dans l'idéal, ne plus avoir de source à conditionner, mais en réalité, il est plus probable qu'il assume la responsabilité de l'entreposage de conteneurs d'entreposage à long terme dans l'entrepôt national où se trouve le reste du stock de sources qui ne pouvaient pas être transportées pour un arrangement à long terme tel que le stockage définitif ou le rapatriement.

Le conteneur d'entreposage à long terme est similaire dans son concept à de nombreux « châteaux de transfert » utilisés dans l'industrie pour transporter de nouvelles sources en vue du rechargement des têtes de téléthérapie. Il peut recevoir quatre tiroirs de sources, chacun pouvant contenir plusieurs sources provenant de têtes de téléthérapie ou d'irradiateurs. Sa conception initiale et l'analyse de sûreté sont basées sur une capacité de 370 GBq (10 000 Ci) de ^{60}Co . Ce conteneur peut être utilisé comme château de transfert, pour l'entreposage de sources, ou peut être transporté dans un suremballage certifié répondant aux prescriptions des colis de type B.

L'AIEA poursuit ses efforts, en collaboration avec les États Membres, pour développer encore la capacité de transport du conteneur blindé d'entreposage à long terme afin de certifier un conteneur de type B pour le transport.

10.8. ENSEIGNEMENTS TIRÉS

10.8.1. Sources à courte période

Dans le passé, l'enfouissement des sources dans le béton, pour confectionner des colis de type A était fréquent [15]. La source dans son enceinte était placée au centre d'un fût en acier doux de 200 L avec un revêtement en béton et des barres soudées, rempli de mortier de ciment et fermé par un couvercle. On considère aujourd'hui que cette méthode n'est ni pratique ni économique. En l'absence d'une voie de stockage définitif et de critères d'acceptation des déchets pour ce stockage, il peut s'avérer nécessaire de reconditionner la source, ce qui peut nécessiter de la sortir du béton, une opération qui serait coûteuse et risquée. Si les futures prescriptions de stockage définitif permettent de stocker le colis tel quel, cela se traduira par un coût plus élevé compte tenu de la taille et du poids des colis. Il est donc extrêmement important de disposer des informations initiales concernant la source conditionnée ainsi que des procédures techniques utilisées pour le processus de conditionnement. En matière de conditionnement, la tendance est clairement d'utiliser autant que possible des méthodes réversibles.

10.8.2. Sources à longue période

Le conditionnement de sources au Ra, à l'Am, à l'Am-Be, au Ra-Be et d'autres sources à longue période retirées du service pour l'entreposage comprend des étapes pour leur encapsulation dans des capsules en acier inoxydable. Cette méthode, qui donne un petit volume de sources encapsulées, permet de les récupérer des colis en vue de leur stockage définitif dans des dépôts géologiques profonds. Dans le cas de sources au Ra, un test d'étanchéité de l'encapsulation s'impose. Des méthodes d'essai d'étanchéité

appropriées sont décrites dans la norme ISO 9978 [22]. La méthode d'essai à la bulle sous vide est la méthode préférée.

Dans le passé, certains fabricants encapsulaient le radium dans des ampoules en verre ou en quartz [18]. La probabilité de fuite de radon dans ces conditions est plus élevée qu'avec des capsules en acier inoxydable soudées. Il faut encapsuler encore ces ampoules dans des conteneurs en acier ou en laiton pour réduire ce risque et les protéger des contraintes mécaniques et autres effets environnementaux.

Pour le conditionnement d'autres sources radioactives scellées à longue période retirées du service telles que les sources au ^{226}Ra -Be, à l' ^{241}Am -Be, au ^{252}Cf qui émettent un rayonnement neutronique, il faudrait inclure des matériaux hydrogénés (par exemple polyéthylène haute densité, cire) dans la conception du blindage du colis préparé pour l'entreposage.

10.8.3. Sources de haute activité

Les opérations liées au retrait d'une source de haute activité (catégories 1 et 2) du porte-source, son transfert dans un autre conteneur et certaines autres opérations requises lors du conditionnement de ce genre de source nécessitent une cellule chaude et un personnel très qualifié. Faute de conteneurs agréés, de cellules chaudes et de personnel, ce conditionnement est difficile, voire impossible dans de nombreux États Membres où les applications nucléaires sont limitées. En fait, le stockage définitif de sources de haute activité n'est possible dans pratiquement aucun pays faute de dépôt géologique. Cela signifie que le conditionnement de ces sources se limite à leur préparation en vue d'un entreposage à long terme [17].

Dans ces conditions, la seule solution possible à ces problèmes est une assistance internationale, par exemple de l'AIEA qui fournit des services permettant de conditionner ces sources et de les rapatrier du pays (voir section 10.7).

Une technique spéciale de conditionnement in situ élaborée en Fédération de Russie permet d'améliorer la sûreté de l'entreposage à long terme des sources de haute activité nues retirées des dispositifs et transférées dans des conteneurs en acier inoxydable entreposés dans des puits peu profonds dans des dépôts de type radon. Elle met en jeu le remplissage progressif du conteneur d'entreposage avec un alliage métallique à bas point de fusion [67].

11. TRANSPORT

La méthode de transport d'une source retirée du service des locaux de l'utilisateur à une installation centrale ou régionale d'entreposage/de stockage définitif dépend, entre autres facteurs, de la condition physique, du type et de l'activité de la source, du type de dispositif, de la disponibilité de colis de transport appropriés, de la capacité de manutention de l'installation de réception et des prescriptions de conditionnement et d'entreposage.

11.1. RÈGLEMENT DE TRANSPORT

Tout transport de matières radioactives sur la voie publique doit s'effectuer conformément au règlement national de transport applicable. Les États Membres se conforment généralement au Règlement de transport de l'AIEA [47]. L'organisme de réglementation est consulté avant l'opération de transport des sources elles-mêmes. S'il n'y a pas d'autorité établie possédant les compétences adéquates dans le pays, on peut solliciter l'assistance de l'AIEA.

Lorsque l'activité de la source est inférieure aux valeurs A_1/A_2 , comme indiqué dans le Règlement de transport de l'AIEA [47], la source peut être transportée dans des colis de transport de type A. Un colis de type A peut être une boîte, un fût ou un contenant similaire, ou même une citerne, un conteneur de fret ou un conteneur pour vrac intermédiaire pouvant renfermer une activité pouvant aller jusqu'à A_2 , ou jusqu'à A_1 si le contenu répond à la définition technique de « matière radioactive sous forme spéciale » :

« Par matière radioactive sous forme spéciale, on entend soit une matière radioactive solide non dispersible, soit une capsule scellée contenant une matière radioactive ».

La valeur A_1 s'applique pour les « matières radioactives sous forme spéciale » (et A_2 s'applique s'il ne s'agit pas d'une matière radioactive sous forme spéciale). Par exemple, pour certains isotopes courants, ces valeurs sont⁸ :

— Cobalt (⁶⁰ Co) :	$A_1 = A_2 = 0,4 \text{ TBq } (\sim 11 \text{ Ci}) ;$	
— Césium (¹³⁷ Cs) ⁹ :	$A_1 = 2 \text{ TBq } (\sim 54 \text{ Ci}),$	$A_2 = 0,6 \text{ TBq } (\sim 16 \text{ Ci}) ;$
— Iridium (¹⁹² Ir) :	$A_1 = 1 \text{ TBq } (\sim 27 \text{ Ci}),$	$A_2 = 0,5 \text{ TBq } (\sim 14 \text{ Ci}) ;$
— Strontium (⁹⁰ Sr) :	$A_1 = 0,2 \text{ TBq } (\sim 5,6 \text{ Ci}),$	$A_2 = 0,1 \text{ TBq } (\sim 2,7 \text{ Ci}) ;$
— Américium (²⁴¹ Am) :	$A_1 = 10 \text{ TBq } (\sim 270 \text{ Ci}),$	$A_2 = 1 \times 10^{-3} \text{ TBq } (\sim 2,7 \times 10^{-2} \text{ Ci}) ;$
— Californium (²⁵² Cf) :	$A_1 = 0,05 \text{ TBq } (\sim 1,4 \text{ Ci}),$	$A_2 = 3 \times 10^{-3} \text{ TBq } (\sim 8 \times 10^{-2} \text{ Ci}).$

On peut s'attendre à ce que de nombreuses sources répondent aux prescriptions de classification comme « matières radioactives sous forme spéciale », en particulier celles fabriquées conformément aux normes en vigueur. Ces prescriptions comprennent des dimensions limites, les épreuves de résistance au choc, de percussion et de pliage ainsi que l'épreuve thermique. Au-delà des caractéristiques techniques, les « matières radioactives sous forme spéciale » sont une catégorie juridique qui influe sur le choix d'une option de transport. Une source ne peut être considérée comme « matière radioactive sous forme spéciale » que si cela est attesté par un « certificat de matière radioactive sous forme spéciale ».

Si l'activité du colis dépasse les valeurs A_1 ou A_2 , celui-ci devra être de type B. Les spécifications détaillées des essais et d'autres critères pour un colis de transport de type A ou de type B figurent dans le Règlement de transport de l'AIEA [47].

Les colis de type A et de type B doivent être durables, lisiblement marqués à l'extérieur et porter l'étiquette de catégorie appropriée. Les étiquettes de catégorie (y compris le symbole de rayonnement ionisant) sont apposées sur deux côtés opposés de l'emballage et sont visibles et dégagées de tout obstacle

⁸ Les valeurs en curie sont approximatives et données ici pour ceux qui y sont familiers.

⁹ Les valeurs de A_1 et de A_2 tiennent compte de la part des produits de filiation de période inférieure à 10 jours.

(fig. 59). Les affiches de mise en garde sur les marquages et les étiquettes de transport doivent être rédigés dans la langue requise par le règlement national de transport, le cas échéant. Les affiches de mise en garde appropriées doivent être apposées sur chaque paroi latérale et chaque paroi d'extrémité des véhicules routiers ainsi que des grands conteneurs de fret (fig. 95) :

« Les sources retirées du service pour lesquelles il n'est pas possible de se conformer aux autres dispositions du Règlement ne peuvent être transportées que sous *arrangement spécial*. Après s'être assurée qu'il n'est pas possible de se conformer aux autres dispositions du Règlement et que la conformité aux normes de sûreté requises fixées par celui-ci a été démontrée par des moyens autres que lesdites dispositions, l'autorité compétente *peut approuver des opérations de transport en vertu d'un arrangement spécial pour un envoi unique ou une série d'envois multiples prévus. Le niveau général de sûreté pendant le transport doit être au moins équivalent à celui qui serait assuré si toutes les prescriptions applicables étaient respectées.* Pour les envois internationaux de ce type, une approbation multilatérale est nécessaire » [47].



FIG. 95. Placardage des véhicules utilisés pour le transport des sources radioactives scellées.

11.2. OPTIONS DE TRANSPORT

Il y a deux options possibles pour le transport des sources retirées du service : soit la source est laissée dans le porte-source d'origine, soit elle en est retirée (fig. 96).

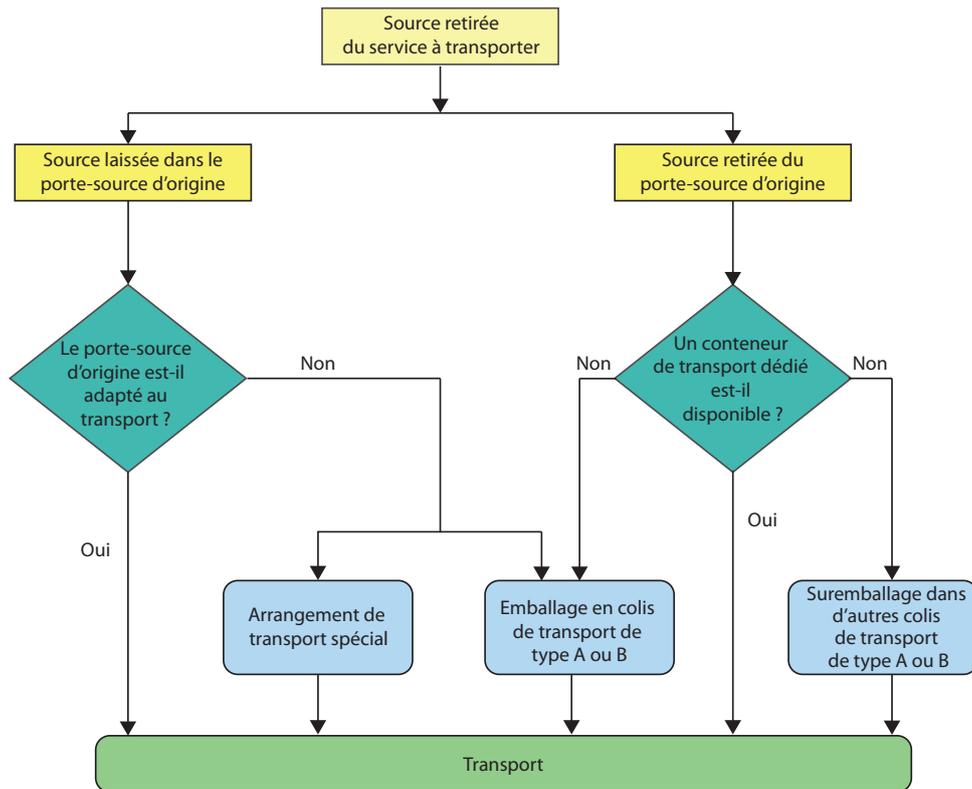


FIG. 96. Options possibles pour le transport des sources scellées retirées du service.

Les sous-sections suivantes examinent les diverses possibilités de transport des sources retirées du service. Les différentes options sont examinées en détail ici, mais l’approbation de l’organisme de réglementation est requise pour toute option choisie par l’utilisateur.

11.2.1. Source laissée dans le porte-source d’origine

Il existe deux options possibles pour cette situation.

11.2.1.1. Transport dans le porte-source d’origine

Dans certains cas, le porte-source peut être qualifié de colis de transport de type A ou de type B sous réserve du respect du règlement de transport en vigueur. Cette approche est certainement sûre, pratique et économique pour l’utilisateur, car elle permet de réduire au minimum la dose de rayonnement lors de la manutention et d’éviter le recours à un emballage de transport. Elle peut également être pratique du point de vue de l’installation de réception, car la dose de rayonnement est réduite au minimum, du moment que les critères d’acceptation des déchets à l’installation de stockage définitif n’exigent pas que la source soit retirée du porte-source. Même si la source doit être retirée avant un entreposage à long terme ou un stockage définitif, il est probable que l’installation de réception sera mieux équipée que l’utilisateur pour effectuer cette opération. Des exemples de porte-sources d’origine pour sources radioactives utilisés comme colis de transport sont présentés à la figure 97.

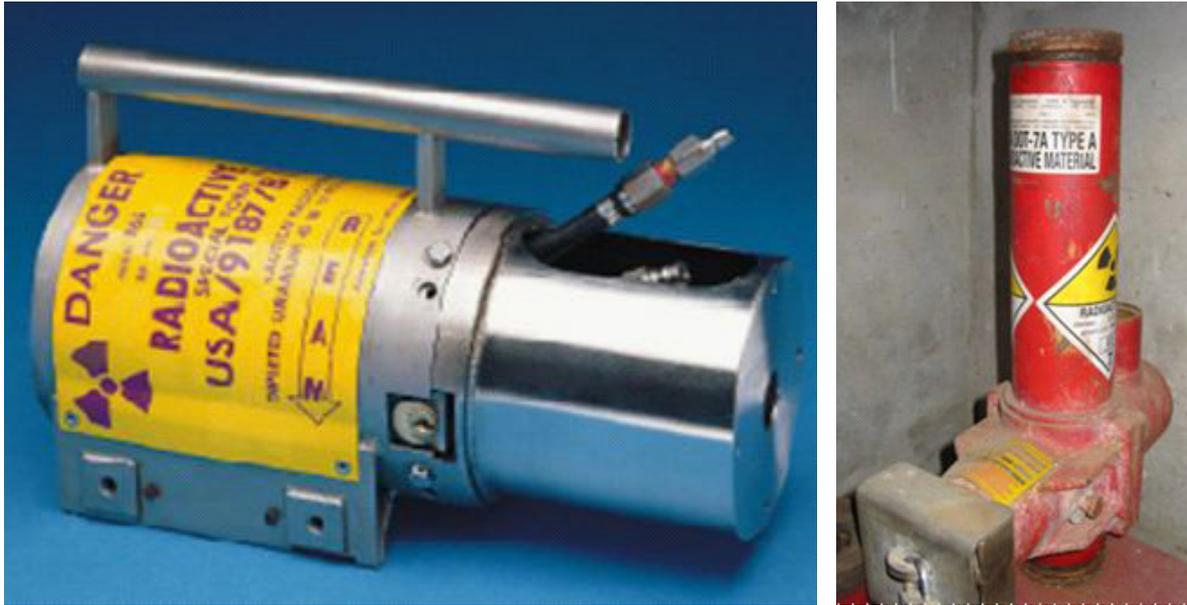


FIG. 97. Exemples de porte-sources d'origine pour sources radioactives utilisés comme colis de transport.

Si le porte-source d'origine ne remplit pas les conditions d'un emballage de transport et que le transport est nécessaire, alors l'approbation peut être accordée sous des conditions d'arrangement spécial. Une autre possibilité serait que l'autorité compétente concernée envisage de renouveler le certificat de transport original pour une courte période afin de permettre le transport de la source retirée du service. Une assistance internationale peut être nécessaire en vue de la détermination et de l'évaluation des paramètres acceptables pour permettre le transport. Chaque étape du transport de la source devra être examinée au cas par cas.

Cette méthode était fréquemment utilisée dans le passé pour transporter de petites sources de radiographie industrielle ne pesant peut-être que 20 à 30 kg (fig. 98). Cependant, elle peut ne plus être applicable, en particulier pour les sources de haute activité. Si cette approche doit être adoptée, il est important de s'assurer que tous les mécanismes de sûreté fonctionnent correctement, par exemple le mécanisme de fixation de l'obturateur.



FIG. 98. Un conteneur spécial devrait être utilisé pour le transport des petites sources, selon leur taille, leur géométrie et leur activité.

11.2.1.2. Transport de la source laissée dans le porte-source dans un emballage de transport agréé

S'il n'est pas possible ni pratique d'enlever une source retirée du service du porte-source sur le site de l'utilisateur, on peut devoir la transporter dans un emballage de transport approuvé d'un volume suffisant pour contenir le porte-source. Cela est particulièrement pratique pour les petits porte-sources dont le poids total peut aller jusqu'à environ 500 kg et dont l'activité se situe dans les limites des colis de type A. Certains modèles de colis de ce type devraient convenir au transport de ces sources. La figure 99 présente un exemple courant de suremballage en fût. Les porte-sources peuvent être transportés dans ce type de conteneur, à condition d'avoir une protection intégrale appropriée et d'être maintenus solidement fixés à l'intérieur du colis pendant le transport.



FIG. 99. Colis de transport de type A avec un grand volume intérieur et une importante capacité de charge (environ 300 kg).

Le transport des porte-sources contenant des sources dont l'activité dépasse les valeurs A_1/A_2 peut nécessiter des colis de transport de type B volumineux et complexes (fig. 100). Ceux-ci sont plutôt chers, ce qui, pour certains pays ayant un nombre relativement limité de sources de catégories 1 et 2, constitue un argument de poids en faveur de la coopération internationale. De toute évidence, cette option nécessiterait des discussions et un accord sur la question des mouvements transfrontières de matières radioactives.



FIG. 100. Colis de type B utilisé pour le transport de sources de catégorie 1.

S'il n'y a pas colis de transport approprié dans un État Membre, on peut demander à l'autorité compétente un arrangement spécial, par exemple, pour permettre de réutiliser le colis de transport d'origine. Cette option peut être une solution moins coûteuse et doit être dûment examinée par les autorités compétentes des États Membres pour faciliter l'enlèvement et l'entreposage approprié des sources retirées du service.

11.2.2. Sources retirées du porte-source d'origine

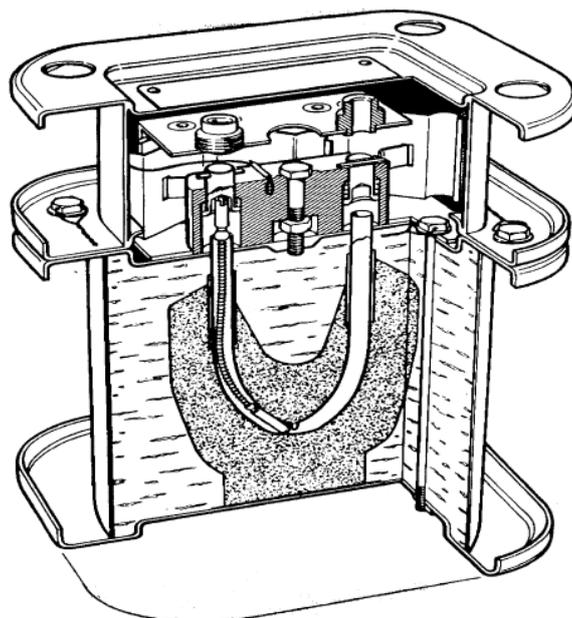
Les sources de catégories 1 et 2 sont généralement associées à une dose d'exposition élevée fournie même pendant de courtes périodes d'exposition. Il ne faut tenter de les retirer du porte-source d'origine qu'en cas de nécessité absolue. Pour des raisons de sûreté, une solide infrastructure (par exemple une installation de cellules chaudes) et des prescriptions techniques/administratives appropriées doivent être en place (voir la section 6). Les travailleurs sous rayonnement qui envisagent d'effectuer une telle opération doivent posséder une expérience étendue dans le domaine de la protection radiologique. La source de haute activité retirée sera placée dans un colis de type B. La figure 101 présente un exemple de colis de type B approprié.



FIG. 101. Exemple de colis de transport de type B.

11.2.2.1. Transfert de la source du dispositif dans le conteneur de transport dédié

De nombreux types de porte-sources sont conçus pour permettre l'échange de sources sur le terrain. C'est le cas de la plupart des dispositifs modernes de radiographie industrielle et de téléthérapie au ^{60}Co . Pour les dispositifs de radiographie industrielle, le processus de retrait de la source du porte-source et son transfert dans un conteneur blindé relativement petit est simple. La figure 102 présente un exemple de colis de transport conçu pour utilisation spéciale avec une source de radiographie industrielle.



Changeur de sources TN 650, COC 0148

FIG. 102. Colis de transport de sources de radiographie industrielle (Type B, 8,8 TBq ¹⁹²Ir).

Pour les dispositifs de téléthérapie, on relie un grand château de transport dédié à la tête de téléthérapie et la source est poussée ou tirée de la tête dans ce château. L'ajustement serré entre la tête de téléthérapie et les emballages de transport permet de réduire au minimum la dose de rayonnement à laquelle sont exposés les travailleurs. Ce type de colis de transfert/transport appartient généralement au fabricant/fournisseur. La figure 103 illustre l'opération d'échange de sources dans une unité de téléthérapie.

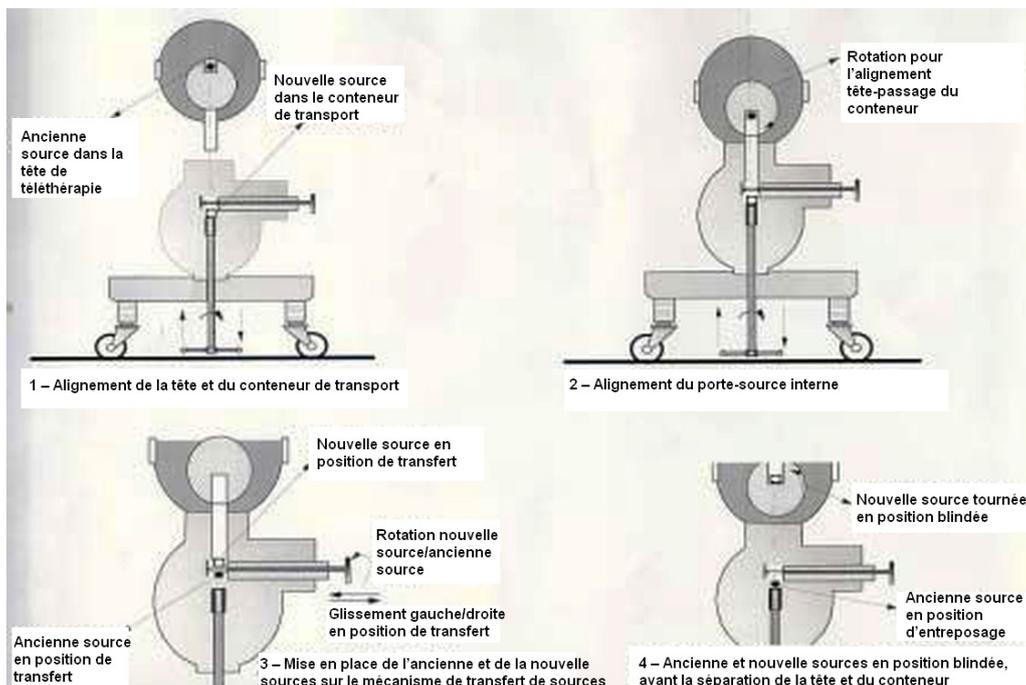


FIG. 103. Diagramme schématique illustrant l'échange de sources dans un dispositif de téléthérapie.

11.2.2.2. Transfert de la source du dispositif dans le colis de transport générique

Pour de nombreux dispositifs plus anciens de téléthérapie et de radiographie industrielle de haute activité, il n'y a pas d'emballage de transport de source dédié, ou le transfert sur le terrain n'est pas approprié en raison de la conception. S'il n'y a pas d'emballage de transport de source dédié, on peut peut-être encore transférer la source dans un autre emballage de transport approprié. En effet, cela peut être essentiel si l'installation de réception n'est pas en mesure de manipuler la source à l'intérieur du porte-source (par exemple en raison de la taille), ou s'il n'y a pas d'emballage approprié pour transporter l'ensemble du dispositif (source à l'intérieur du porte-source, voir ci-dessous).

Un certain nombre d'emballages de transport très polyvalents sont disponibles lorsqu'on se propose de transférer la source depuis le porte-source dans un emballage de transport blindé. Ce transfert nécessite une installation appropriée et un personnel bien formé. La figure 104 présente une série de conteneurs avec différentes épaisseurs de blindage. Ceux-ci peuvent s'emboîter les uns dans les autres pour donner une gamme de formats de type A et B avec une épaisseur totale de blindage allant jusqu'à 150 mm. Ce type d'emballage permet d'avoir une grande cavité interne et offre une flexibilité considérable.



FIG. 104. Chargement d'un conteneur intérieur blindé pour sources au ^{137}Cs dans un colis de type B, après le retrait des sources d'un irradiateur de recherche.

Les emballages de transport génériques, tels que celui décrit ci-dessus, ne sont pas conçus dans le but particulier de transférer une source à partir d'un modèle particulier de porte-source. Par conséquent, il faudra élaborer une solution technique adaptée permettant le transfert de la source dans l'emballage en réduisant au minimum la dose de rayonnement pour les opérateurs. Par exemple, l'emballage peut être lié directement au porte-source, ou alors, le transfert peut se faire en deux temps avec un château de transport fabriqué sur mesure. Il faut dans tous les cas éviter le transfert de sources de catégories 1 et 2 non blindées. L'utilisation de l'approche ci-dessus requiert des procédures techniques élaborées, testées et exécutées par un personnel qualifié.

À la réception à l'installation d'entreposage, il faudra également trouver une solution pour retirer la source de l'emballage de transport. Cela se fait généralement l'intérieur d'une cellule chaude.

Si les compétences locales sont insuffisantes pour retirer la source, ou si l'équipement ou les outils ne sont pas disponibles, alors il faut demander assistance à un fournisseur/fabricant/propriétaire d'emballages/de sources similaires, une organisation étrangère de gestion des déchets ou un organisme international (par exemple l'AIEA).

11.3. PROBLÈMES RENCONTRÉS ET ENSEIGNEMENTS TIRÉS

Dans de nombreux cas, les sources restent dans les locaux de l'utilisateur en raison des problèmes rencontrés pour déterminer une méthode appropriée et économique en vue de les transporter chez le fournisseur/fabricant, un autre utilisateur, une installation de conditionnement, une installation d'entreposage dans un organisme central de gestion des déchets radioactifs ou une installation de stockage définitif en se conformant à la réglementation internationale pertinente en matière de transport [48]. Certaines des principales raisons pour lesquelles les sources retirées du service ne sont pas rapidement transportées du site de l'utilisateur sont les suivantes :

- un financement insuffisant ;
- des problèmes de licence ;
- l'absence de certificat de source ou d'informations sur les sources ;
- l'absence de certificat de matière radioactive sous forme spéciale ;
- l'absence de conteneur de transport certifié approprié.

Il est important que les autorités compétentes et les titulaires de licences collaborent pour trouver des solutions à ces problèmes en vue du transport sûr des sources retirées du service.

11.3.1. Financement insuffisant

À l'heure actuelle, le transport des sources retirées du service à l'étranger coûte souvent cher parce que l'emballage de transport d'origine n'est pas disponible ou que son certificat a expiré. Une fois que l'équipement a été acheté et livré, une installation peut ne pas couvrir le coût du transfert de propriété de la source lorsque l'équipement est finalement retiré du service. Il se peut que ce soit parce que les propriétaires de l'installation n'ont pas de mécanisme budgétaire pour comptabiliser un coût qui ne sera réalisé que bien plus tard dans le futur (peut-être des décennies) et dont on ne peut qu'estimer le montant. Il est aussi possible que ce soit parce que l'installation suppose qu'elle peut couvrir les frais de transfert de propriété sur son budget de fonctionnement ou comme condition d'achat de nouveaux équipements. Cela peut entraîner une pression financière quand arrive le moment du transfert de propriété, avec la tentation correspondante d'utiliser des options moins chères. Celles-ci pourraient augmenter la probabilité de perdre le contrôle de la source usée ou retirée du service.

11.3.2. Problèmes de licence

Le transport de matières radioactives est soumis à l'obtention d'une licence dans certains pays. En conséquence, lorsque des sources sont transportées à travers plusieurs frontières, il faut recourir à une entreprise locale ou un chauffeur originaire du pays où un tel règlement est en vigueur. Cela entraîne des tâches administratives et des coûts supplémentaires importants.

11.3.3. Absence de certificat de source ou d'informations sur la source

Le certificat de source ou les informations sur la source sont nécessaires pour décider si celle-ci peut être transportée dans un emballage disponible. Ce certificat ou ces informations peuvent être utilisés pour déterminer si l'activité et les dimensions physiques de la source sont compatibles avec cet emballage. S'il n'y a pas de certificat de source ni d'informations sur celle-ci, les options suivantes peuvent être envisagées :

- a) le fabricant ou le fournisseur peuvent fournir un nouveau certificat de source ou des informations sur celle-ci ;
- b) la source doit être caractérisée pour déterminer son activité, son isotope et l'intégrité de son confinement.

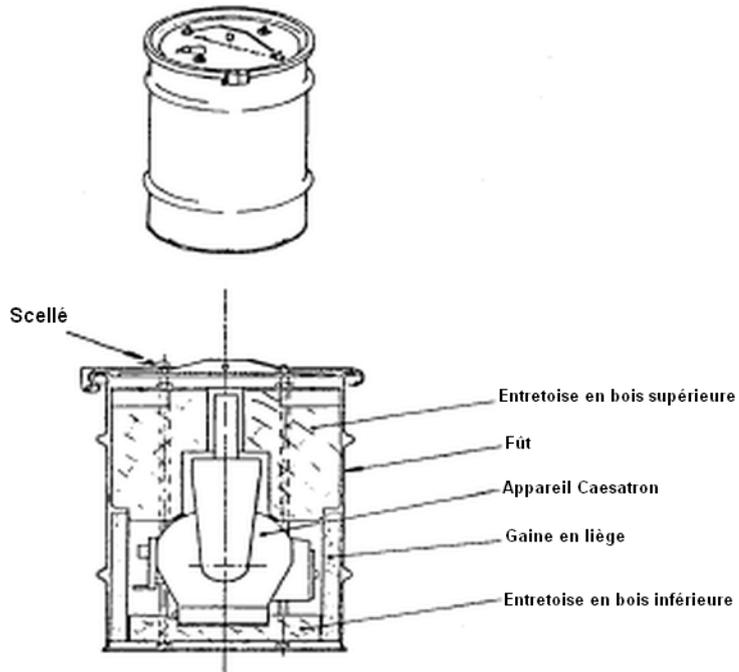
11.3.4. Absence de certificat de matière radioactive sous forme spéciale

Dans de nombreux cas, il peut arriver que le certificat de matière radioactive sous forme spéciale ne soit plus valide pour la source retirée du service. C'est généralement le cas lorsque la conception de la capsule est obsolète ou que le fabricant de la source n'est plus en activité et, par conséquent, n'est plus en mesure de prolonger la validité dudit certificat. L'expiration de celui-ci ne signifie pas que la source radioactive ne répond plus aux prescriptions techniques relatives aux « matières radioactives sous forme spéciale ». Il est possible qu'elle réponde toujours aux exigences de confinement pour les colis de type B et, par conséquent, puisse être transportée en sûreté. L'autorité compétente et le titulaire de licence doivent collaborer pour trouver une solution réalisable afin de faciliter le transport de la source radioactive scellée. Cela pourrait signifier le renouvellement du certificat de matières radioactives sous forme spéciale pour une courte période, l'amendement du certificat de transport pour inclure la source radioactive en tant que matière radioactive sous forme non spéciale ou la délivrance d'une licence d'arrangement spécial.

11.3.5. Inadéquation de l'emballage de transport d'origine

Même s'il y a un certificat de source et un certificat de matière radioactive sous forme spéciale, il est possible que l'emballage de transport dans lequel ont été livrés la source ou le dispositif à l'origine ne soit plus conforme au règlement de transport en vigueur. Dans la plupart des cas, il peut encore être en bon état, mais le certificat d'approbation de l'autorité compétente n'est plus valide. Un exemple de ce problème est celui des anciennes têtes de téléthérapie qui ont été livrées complètes avec leurs sources dans des suremballages simples (fig. 105).

Parfois, il n'y a pas de conteneur de transport approprié ou on ne connaît pas le modèle du porte-source et le schéma décrivant la séquence de la procédure de retrait de la source n'est pas disponible (perdu). Dans ces conditions, on ne peut recharger la source radioactive scellée retirée du service et son transport ne peut s'effectuer que dans le cadre d'arrangements spéciaux. Par exemple, le corps d'un irradiateur (avec quelques mises à niveau en matière de sûreté) peut être utilisé pour le transport et l'entreposage provisoire des sources radioactives scellées retirées du service (voir figure 106). Ce transport est soumis à l'approbation et au contrôle des organismes nationaux de réglementation.



Description de l'emballage, dimensions et poids :

Emballage	Fût isotherme en acier portant un irradiateur de plomb et d'acier
Dimensions	520 mm de diamètre x 864 mm de hauteur
Poids brut	298 kg

FIG. 105. Emballage de transport pour une ancienne unité de téléthérapie au ^{137}Cs non conforme aux normes en vigueur.



FIG. 106. Irradiateur chargé de sources radioactives scellées retirées du service au ^{137}Cs prêt pour le transport dans une installation de stockage définitif.

12. STOCKAGE DÉFINITIF

Les sources radioactives scellées retirées du service pour lesquelles il n'y a aucune option de recyclage ou de rapatriement devraient être déclarées comme des déchets et être stockées dans une installation de stockage définitif conformément aux instruments juridiques internationaux pertinents, aux normes de sûreté et aux bonnes pratiques, afin de garantir leur gestion sûre à long terme. La mise en place d'une telle installation nécessite une infrastructure appropriée comprenant une politique nationale de gestion des déchets et une stratégie d'application correspondante [50], un cadre réglementaire et les ressources financières, humaines et techniques pertinentes requises. Si ces sources ne peuvent pas être facilement stockées définitivement dans des installations déjà existantes ou prévues, il faut élaborer une solution spéciale pour un tel stockage et fournir l'infrastructure correspondante. Dans un tel contexte, la mise en œuvre d'une voie appropriée de stockage définitif de ces sources reste un sujet de préoccupation au niveau international, en particulier dans les États Membres aux ressources limitées [68 à 71].

La section 2.1 décrit certains facteurs importants à prendre en compte lors du choix d'une option de stockage définitif appropriée. Le stock de sources et les caractéristiques correspondantes des radionucléides dont le stockage définitif est envisagé devraient être évalués. Les besoins en matière de stockage définitif devraient être évalués compte tenu des prescriptions de sûreté relatives au stockage définitif des déchets radioactifs [72]. À cet égard, une attention particulière est accordée à l'activité volumique courante de nombreuses sources radioactives scellées retirées du service, ainsi qu'à d'autres considérations telles que l'activité globale et les périodes. Les options de stockage définitif devraient être examinées dans le contexte du cadre national plus large des plans actuels et futurs liés à l'utilisation de la technologie nucléaire, à la recherche et/ou à la production électronucléaire. Les sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets sont généralement conditionnées en colis de déchets qui doivent être conçus en vue d'en garantir l'acceptabilité pour stockage définitif dans une installation donnée. Enfin, les critères d'acceptation des déchets fournissent un outil de gestion pour vérifier si un stock donné de sources radioactives scellées retirées du service emballé peut être accepté pour stockage définitif dans une installation donnée, s'il faut effectuer une évaluation supplémentaire ciblée de la sûreté ou s'il faut trouver une autre voie de stockage définitif.

En principe, on peut trouver une solution de stockage définitif appropriée pour toutes les sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets. Les options disponibles comprennent des installations de stockage définitif soit en surface ou à faible profondeur, soit dans des dépôts géologiques, soit encore dans des puits spécialement prévus à cet effet. Elles sont brièvement examinées à la section 2.2. Des progrès considérables ont été accomplis en ce qui concerne le stockage définitif des déchets de faible et moyenne activité, et des installations de stockage définitif acceptant ces types de déchets fonctionnent depuis plusieurs décennies. En outre, plusieurs pays ont soumis ou sont sur le point de soumettre une demande d'autorisation pour la construction d'une installation de stockage définitif dans des dépôts géologiques destinée à recevoir des déchets de moyenne activité, des déchets de haute activité et/ou du combustible usé déclaré comme déchets. Enfin, le concept de stockage définitif dans des puits a été dûment examiné et est proposé comme possibilité de stockage définitif dédié pour des sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets. L'expérience disponible et les enseignements tirés en ce qui concerne ces types d'installations de stockage définitif sont examinés brièvement à la section 2.3.

12.1. FACTEURS DONT DÉPEND LE CHOIX DES OPTIONS DE STOCKAGE DÉFINITIF

Les stocks de sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets peuvent être stockés définitivement soit avec d'autres déchets radioactifs dans des installations de stockage définitif existantes ou en projet, soit dans une installation de stockage spécialement conçue pour accueillir ces stocks. En outre, une solution de stockage définitif dédiée peut, dans certaines conditions, être mise en œuvre sur le même site qu'une installation déjà existante, ou certains aspects de la conception de celle-ci

peuvent être adaptés comme condition préalable à l'acceptation des sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets dans cette installation.

La solution la plus appropriée pour un État Membre dépendra de plusieurs facteurs, en particulier du stock de sources radioactives scellées retirées du service et des besoins de stockage définitif associés, ainsi que du stock de déchets radioactifs qui pourrait être attendu d'autres activités et pour lequel des installations de stockage définitif peuvent déjà être prévues ou disponibles.

Quel que soit le contexte, les besoins en matière de stockage définitif devraient être évalués en tenant compte des prescriptions de sûreté relatives au stockage définitif des déchets radioactifs. Dans un premier temps, il faudrait associer les sources radioactives scellées retirées du service à une classe de déchets pour comprendre les besoins en matière de stockage définitif associés. Les sources radioactives scellées sont classées en fonction du risque qu'elles posent lorsqu'elles sont hors de contrôle. Ce classement est différent de la catégorisation de déchets établie pour aider à prendre des décisions stratégiques en matière de stockage définitif, et les propriétés radiologiques des sources doivent être évaluées pour décider d'une option de stockage appropriée. Par conséquent, pour opérer des choix éclairés, il faudrait comprendre le système de classification des déchets de l'AIEA, évaluer les propriétés radiologiques des sources radioactives scellées retirées du service et établir une correspondance avec ce système, et choisir les options de stockage définitif appropriées pour que celui-ci soit sûr et efficace.

12.1.1. Système de classification des déchets de l'AIEA

Pour savoir quelle option de stockage définitif pourrait convenir, il faut d'abord se demander dans quelles classes de déchets on devra ranger les sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets. Si une source scellée retirée du service est déclarée comme déchet radioactif, tous les principes de sûreté applicables aux déchets [28] s'appliquent à cette source. L'AIEA a élaboré un système de classification des déchets accepté sur le plan international qui permet de regrouper les déchets radioactifs, y compris les sources radioactives scellées retirées du service, dans les six classes suivantes en fonction de l'activité et de la période des radionucléides [66] :

- 1) Déchet exempté (DE) : déchet qui satisfait aux critères de libération, d'exemption ou d'exclusion du contrôle réglementaire aux fins de la radioprotection comme indiqué dans la référence [59].
- 2) Déchet à très courte période (DTCP) : déchet qui peut être entreposé pour décroissance pendant une période limitée allant jusqu'à quelques années, puis libéré du contrôle réglementaire selon les modalités approuvées par l'organisme de réglementation, pour un stockage définitif, une utilisation ou un rejet non contrôlés. Cette classe comprend des déchets contenant principalement des radionucléides à très courte période souvent utilisés pour la recherche ou en médecine.
- 3) Déchet de très faible activité (DTFA) : déchet qui ne satisfait pas nécessairement aux critères de DE, mais qui ne nécessite pas un niveau élevé de confinement et d'isolement et se prête donc au stockage définitif en surface ou à faible profondeur dans une installation de type décharge avec un contrôle réglementaire limité. Ce type de décharge peut contenir d'autres déchets dangereux. On trouve généralement très peu de radionucléides à période relativement longue dans les DTFA.
- 4) Déchet de faible activité (DFA) : déchet au-dessus des niveaux de libération, mais contenant des quantités limitées de radionucléides à longue période. Ce type de déchet exige un isolement et un confinement poussés pour des périodes allant jusqu'à quelques centaines d'années et convient pour un stockage définitif dans des installations construites en surface ou à faible profondeur. Cette classe comprend une très vaste gamme de déchets. Les DFA peuvent contenir des radionucléides à courte période avec des concentrations d'activité élevées et des radionucléides à longue période mais avec des concentrations d'activité relativement faibles.
- 5) Déchet de moyenne activité (DMA) : déchet qui, du fait de son contenu, en particulier en radionucléides à longue période, exige un degré de confinement et d'isolement plus grand que ne permet le stockage en surface ou à faible profondeur. Toutefois, les DMA ne nécessitent au plus qu'un système limité de dissipation de la chaleur pendant l'entreposage et le stockage définitif.

Ils peuvent contenir des radionucléides à longue période, en particulier des émetteurs alpha, dont l'activité volumique ne tombera pas à un niveau suffisamment bas pour un stockage définitif en surface ou à faible profondeur pendant la période durant laquelle on peut s'en remettre aux contrôles institutionnels. Les déchets de cette classe doivent donc être stockés à des profondeurs plus grandes, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.

- 6) Déchet de haute activité (DHA) : déchet ayant une concentration d'activité suffisamment élevée pour produire d'importantes quantités de chaleur par décroissance radioactive ou déchet contenant de grandes quantités de radionucléides à longue période dont il faut tenir compte dans la conception de l'installation de stockage définitif. L'option habituellement retenue pour les DHA est le stockage définitif dans des formations géologiques stables et profondes, généralement à plusieurs centaines de mètres ou plus sous la surface.

Les classes de déchet définissent des orientations générales sur la durée et la robustesse du confinement et de l'isolement, ainsi que d'autres considérations telles que celles liées à la dissipation de la chaleur, qui sont nécessaires pour le stockage définitif sûr des déchets. Elles permettent de déduire des orientations générales sur les options appropriées pour une installation de stockage définitif correspondante.

12.1.2. Stock de sources radioactives scellées retirées du service, caractéristiques des radionucléides et classes de déchets correspondantes

Si le stock de sources radioactives scellées retirées du service comprend plusieurs classes de déchets, alors différentes options doivent être envisagées pour leur stockage définitif, allant du stockage définitif en surface ou à faible profondeur au stockage en formations géologiques, en passant par le stockage dans des installations de type puits de différentes profondeurs. Les considérations de sûreté permettent de regrouper le stock dans l'option de stockage définitif adaptée à la classe de déchets de plus haute activité. Cependant, des considérations de coût, le volume global du stock de sources radioactives scellées retirées du service et l'option possible d'utiliser des installations existantes pour les classes de déchets de moindre activité, peuvent permettre d'envisager le stockage définitif de ces sources dans plusieurs installations de stockage définitif appropriées.

On ne peut analyser les besoins en matière de stockage définitif que si on connaît le stock de sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets. Les caractéristiques physiques et radiologiques de ces sources, telles que la teneur en radionucléides, les périodes, les activités totales et les concentrations d'activité sont très variables. Elles déterminent la classe de déchets dans laquelle les sources doivent être rangées, conformément à la classification présentée dans la section précédente, et donc la durée du confinement et la robustesse du confinement et l'isolement attendus de l'option de stockage définitif retenue. Il n'y a pas de correspondance exacte entre les catégories de source 1 à 5 et la classe de déchets à laquelle elles appartiendront ultérieurement. De toute évidence, les sources contenant des radionucléides d'activités plus élevées et de périodes plus longues nécessitent un degré de confinement et d'isolement plus élevé et devront probablement être rangées dans les DMA. Les autres peuvent remplir les critères de DTFA.

Certaines orientations préliminaires peuvent être fournies sur la base de l'analyse des propriétés communes des sources radioactives scellées retirées du service et des radionucléides associés. Les données relatives aux radionucléides utilisés dans les sources radioactives scellées pour diverses applications sont résumées dans la référence [23]. Le tableau 8 est basé sur les données présentées dans cette référence et à titre d'exemple, donne les périodes et la gamme d'activités de certains radionucléides utilisés dans les sources radioactives scellées.

TABLEAU 8. PÉRIODES ET INTERVALLES D'ACTIVITÉS DE CERTAINS RADIONUCLÉIDES UTILISÉS DANS LES SOURCES RADIOACTIVES SCELLÉES POUR DIFFÉRENTES APPLICATIONS

Principal radionucléide	Période	Activité minimale du nucléide (Bq)	Activité maximale du nucléide (Bq)	Application
^3H	12,3 a	1,9E + 09	1,1E + 10	Applications militaires, industrielles, dispositifs électroluminescents gazeux, cibles pour tubes à neutrons
^{60}Co	5,3 a	9,3E + 09	5,6E + 17	Irradiateurs, téléthérapie, radiographie industrielle, curiethérapie, jauges industrielles
^{75}Se	120 j	3,0E + 12	3,0E + 12	Radiographie industrielle
^{85}Kr	10,7 a	1,9E + 09	3,7E + 10	Jauges industrielles, paratonnerres
^{90}Sr	28,6 a	3,7E + 08	2,5E + 16	GTR, mesure d'épaisseur, applicateurs oculaires
^{125}I	60 j	1,5E + 09	3,0E + 10	Curiethérapie
^{137}Cs	30,1 a	3,0E + 08	1,9E + 17	Irradiateurs, curiethérapie, jauges industrielles, diagraphie de puits/jauges d'humidité
^{169}Yb	32 j	9,3E + 10	3,7E + 11	Radiographie industrielle
^{170}Tm	129 j	7,4E + 11	7,4E + 12	Radiographie industrielle
^{192}Ir	74 j	7,4E + 08	7,4E + 12	Radiographie industrielle, curiethérapie
^{226}Ra	1 600 a	2,6E + 05	1,9E + 09	Curiethérapie, paratonnerres, détecteurs de fumée
^{238}Pu	87,8 a	1,1E + 11	1,0E + 13	GTR, stimulateurs cardiaques
$^{239}\text{Pu-Be}$	24 100 a	7,4E + 10	3,7E + 11	Recherche
^{241}Am	432 a	4,8E + 07	8,5E + 11	Jauges industrielles, détecteurs de fumée, paratonnerres, ostéodensitométrie
$^{241}\text{Am-Be}$	432 a	1,9E + 10	8,5E + 11	Recherche
^{244}Cm	18,1 a	7,4E + 09	3,7E + 10	Jauges industrielles
^{252}Cf	2,6 a	1,1E + 06	4,1E + 09	Jauges industrielles, diagraphie pétrolière, activation neutronique, application médicale

Il conviendrait de noter que les intervalles d'activités figurant dans le tableau 8 se rapportent aux sources en cours d'utilisation. Lorsqu'elles sont retirées du service, leur activité est égale ou inférieure à l'activité minimale indiquée et diminue encore en fonction de leur période. À titre d'exemple, un stock de sources radioactives scellées retirées du service ayant des propriétés particulières peut convenir aux différentes options de stockage définitif ci-dessous selon le cas :

- les sources radioactives dont les niveaux d'activité sont inférieurs aux niveaux de libération, comme cela pourrait être le cas, par exemple pour les détecteurs de fumée et à condition que cette option soit prévue par la réglementation nationale, peuvent être stockées définitivement dans des décharges, conformément à l'option de gestion des déchets exemptés ;
- les sources radioactives d'activité faible à moyenne et de très courtes périodes (généralement moins de 100 jours environ) se désintègrent pour atteindre des niveaux de libération en quelques années. Du point de vue de la gestion des déchets, on peut les laisser se désintégrer en sûreté dans une installation d'entreposage, conformément à l'option de gestion pour les DTCP ;
- même si elles peuvent contenir des radionucléides à très longues périodes tels que le ^{14}C (période = 5 700 ans), le ^{36}Cl (période = 300 000 ans) et l' ^{129}I (période = 17 millions d'années), les sources

radioactives de très faibles niveaux d'activité, comme celles que l'on peut utiliser par exemple pour étalonner des instruments, pourraient être acceptables dans des installations de stockage définitif en surface ou à faible profondeur, ou encore de type décharge, conformément à l'option de gestion des DTFA ;

- d'une manière générale, on peut stocker définitivement des sources radioactives à courte période (jusqu'à environ 30 ans, comme le ^{60}Co , le ^{90}Sr et le ^{137}Cs) dans des installations en surface ou à faible profondeur si leur activité est censée diminuer aux limites fixées par l'analyse de sûreté pendant la durée prévue de contrôle institutionnel et si tous les critères de densité d'activité sont respectés, conformément à l'option de gestion des DFA. Cela correspond en gros aux sources dont l'activité diminue jusqu'aux niveaux de libération dans les 300 ans et ne dépasse pas les niveaux d'activité spécifique définis dans l'argumentaire de sûreté ;
- les sources de haute activité à courte période et les sources contenant des radionucléides à longue période, comme le ^{238}Pu et le ^{226}Ra , peuvent nécessiter un stockage définitif en formations géologiques assurant une sûreté à long terme, conformément à l'option de gestion des DMA.

Tous les exemples ci-dessus se rapportent aux installations de stockage définitif mises en place pour la gestion des déchets radioactifs en général. Si on veut établir une installation de stockage définitif spécialement pour les sources radioactives scellées retirées du service, un puits peut être l'option la plus efficace qui offrira un degré de protection approprié [73]. En fonction de son emplacement et de sa profondeur, il pourrait en principe assurer le niveau d'isolement et de confinement compatible avec les DFA, ainsi que les DMA. Ce puits pourrait être mis en place comme une installation autonome ou creusé sur le même site qu'une autre installation de stockage définitif.

Les aspects quantitatifs, par exemple les valeurs d'activité admissibles pour chaque radionucléide important ainsi que les chiffres de concentration locale d'activité et de puissance thermique seront précisés sur la base d'évaluations de la sûreté de l'installation de stockage définitif proprement dite. Ces valeurs sont pertinentes pour les scénarios de sûreté utilisés pour les évaluations, y compris les considérations relatives au rejet et au transfert de radionucléides dans l'environnement accessible et à la probabilité d'intrusion accidentelle. Ces aspects qualitatifs peuvent ensuite être précisés dans le cadre des critères d'acceptation des déchets en tant qu'outils de gestion qui aideront à décider si des déchets radioactifs donnés peuvent être stockés définitivement en sûreté dans cette installation.

12.1.3. Options de stockage définitif de sources radioactives scellées retirées du service dans le contexte du stock national de déchets radioactifs

Une option appropriée de stockage définitif pour le stock de sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets devrait être choisie conformément au contexte sociopolitique et réglementaire national plus large et en tenant compte des aspects suivants : i) le stock de déchets radioactifs ; ii) les caractéristiques du site ; et iii) la conception des installations de stockage. Le contexte national est illustré à la figure 107.

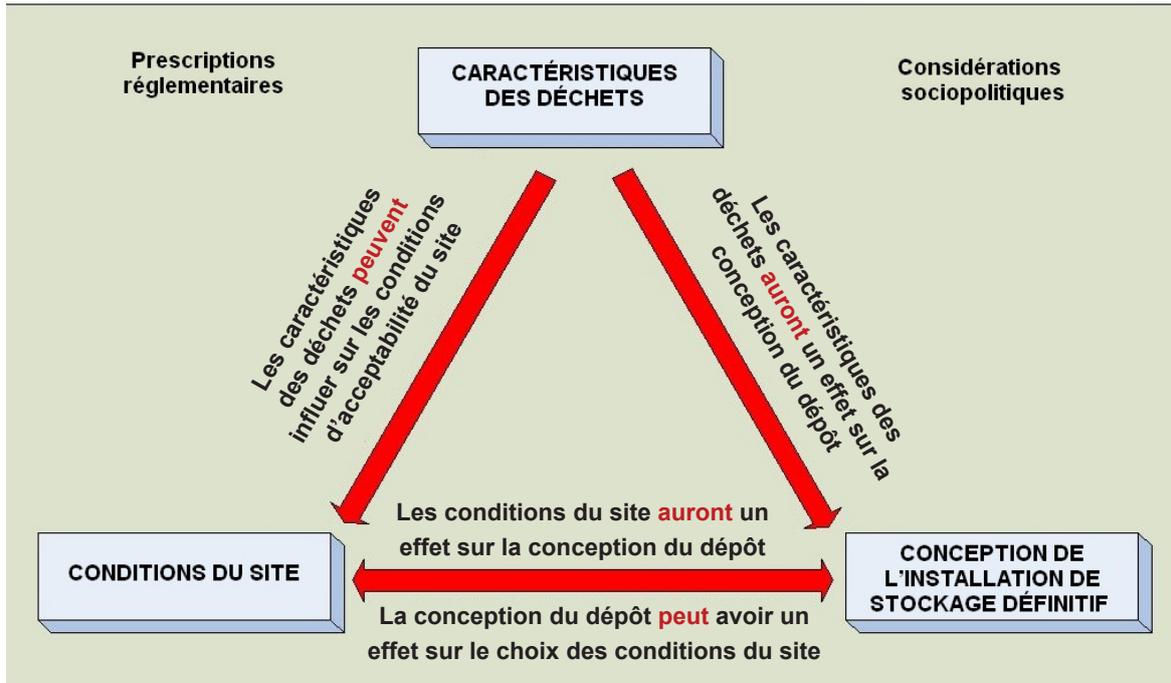


FIG. 107. Effet des caractéristiques du stock total de déchets sur la conception du dépôt.

Pour les petits programmes de gestion de déchets radioactifs constitués essentiellement ou exclusivement de sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets, il est recommandé d'établir une (ou plusieurs) installation(s) dédiée(s) de stockage définitif. Le concept de stockage définitif en puits est une solution bien étudiée permettant un stockage efficace et sûr de petits volumes de déchets radioactifs [73]. Si une expérience initiale de la mise en œuvre de ce concept s'avère nécessaire, une option appropriée pourrait alors être, dans un premier temps, le stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service identifiées comme DFA dans une installation dédiée de stockage définitif en puits, et dans une deuxième étape, le stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service identifiés comme des DMA dans une installation de stockage définitif en puits séparée permettant un niveau plus élevé d'isolement et un meilleur confinement. En revanche, si une expérience a déjà été acquise grâce à une mise en œuvre préalable du concept de stockage définitif en puits, démontrant efficacement sa robustesse, alors il serait peut-être préférable de sélectionner l'option de stockage définitif appropriée pour les DMA et de stocker définitivement aussi les sources radioactives scellées retirées du service définies comme DFA dans ce même puits.

Il faut également étudier la manière d'adapter le stockage définitif des sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets à l'infrastructure plus large de gestion des déchets radioactifs, par exemple aux installations de stockage existantes ou prévues destinées à accueillir des DTFA ou des DFA.

Plusieurs options peuvent être envisagées pour les programmes de gestion des déchets radioactifs portant sur un stock plus important, par exemple de DFA et de sources radioactives scellées retirées du service. Le stock des sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets acceptables pour stockage définitif dans une installation de stockage définitif de DFA en surface ou à faible profondeur pourrait être conditionné dans un colis de déchets approprié et stocké définitivement comme d'autres DFA. Il faudra peut-être accorder une attention particulière à la combinaison de la concentration d'activités et de périodes des sources radioactives scellées retirées du service, car elle peut être plus élevée que celle des autres DFA. Cela peut ou ne pas être compatible avec les critères d'acceptation des déchets pour les installations de stockage définitif de type décharge ou encore en surface ou à faible profondeur. Si ce n'est pas compatible, on peut évaluer l'option d'entreposer une partie du stock de sources jusqu'à

ce que la désintégration naturelle réduise l'activité volumique à un niveau compatible avec les critères d'acceptation des déchets. Si cette option n'est pas raisonnable, c'est-à-dire que le stockage définitif sûr nécessite un niveau de confinement et d'isolement plus élevé que celui fourni par le stockage définitif en surface ou à faible profondeur, l'option disponible et efficace peut être le stockage définitif en puits à une profondeur appropriée et avec des barrières artificielles adéquates. Ce stockage pourrait alors se faire, ou non, dans l'installation existante de stockage définitif en surface ou à faible profondeur, en fonction des propriétés du site et d'autres considérations.

Si, en plus de l'exploitation d'une installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur, le programme de gestion des déchets radioactifs a besoin d'élaborer des solutions pour le stockage définitif des DMA ou des DHA, alors les sources radioactives scellées retirées du service inacceptables pour stockage dans l'installation existante pourraient être entreposées à long terme jusqu'à la mise en service d'un dépôt géologique.

12.1.4. Conditionnement des sources radioactives scellées retirées du service pour le stockage définitif – colis de déchets

Un dispositif radioactif contient un ou plusieurs radionucléide(s) de radioactivité et de forme chimique connues, scellés dans une capsule spéciale assurant un confinement primaire. La plupart du temps, il faudra conditionner davantage les sources radioactives et les emballer avant leur stockage définitif pour renforcer leur confinement à long terme (voir la section 10) et adapter le colis de déchets à l'installation de stockage définitif. Un colis de sources radioactives destiné au stockage définitif peut contenir plus d'un type de source et comprendre des couches de confinement supplémentaires et on peut ajouter un matériau de matrice pour améliorer sa performance globale de sûreté. Il fournit une barrière artificielle efficace pour l'isolement et le confinement, et devrait être conçu de manière à être adapté et à correspondre à l'option de stockage définitif choisie.

Les prescriptions de conception pour un colis de stockage définitif sont examinées en détail dans la référence [48]. Le colis pourrait être conçu pour contribuer au confinement des sources radioactives en empêchant ou en limitant le rejet de radionucléides dans la géosphère. Deux approches peuvent être appliquées pour assurer la longévité du confinement, à savoir : l'utilisation soit de matériaux résistants à la corrosion, soit d'un conteneur à parois épaisses dont la corrosion prendrait beaucoup de temps. Dans les deux cas, les matériaux choisis pour l'emballage et les effets de l'environnement physique et géochimique dans la zone de stockage définitif jouent un rôle important. La couche externe de l'emballage peut généralement être constituée de métal, de béton ou de matériaux composites. La matrice (matériau de remplissage) dans laquelle les sources radioactives sont immobilisées peut également avoir un effet notable sur les propriétés du colis et influencer fortement ses performances requises.

Il peut y avoir des processus chimiques, microbiologiques ou radiolytiques à l'intérieur du colis de source radioactive, donnant lieu à des gaz, de la chaleur et/ou de la corrosion, en fonction du radionucléide, de son activité et des caractéristiques des matériaux du colis. Les problèmes potentiels de production de gaz devraient être examinés au début du processus d'élaboration d'un concept de stockage définitif et de la conception des unités de stockage [74 à 77].

L'activité maximale qui sera acceptée dans un colis doit être déterminée à partir des évaluations de la sûreté opérationnelles et post-fermeture. Dans certains cas, l'emballage peut réduire suffisamment les niveaux de rayonnement externe pour permettre la manutention et le transport. La protection n'est cependant pas un problème une fois que le colis est stocké définitivement, et il peut y avoir des considérations spéciales pour l'entreposage et le transport si le colis de stockage définitif ne fournit pas une protection adéquate.

Si le stockage définitif doit se faire dans des unités de stockage aux dimensions limitées, comme dans des puits, les dimensions extérieures du colis de stockage définitif doivent être adaptées à cette contrainte. D'autres prescriptions techniques, par exemple les prescriptions de manutention, peuvent aussi imposer d'autres contraintes à la conception des colis.

Les considérations relatives au regroupement et à l'emballage des sources radioactives scellées retirées du service en colis de déchets, et la conception correspondante de celui-ci, devraient être examinées en tenant compte de l'option de stockage définitif privilégiée pour le stock de sources. En particulier, l'activité volumique dans un colis de déchets donné peut être un critère déterminant si celui-ci est accepté pour stockage dans une installation en surface ou à faible profondeur. Plus généralement, la conception des colis de déchets et les déchets eux-mêmes dépendent des critères d'acceptation des déchets de l'installation de stockage définitif et donc également des scénarios de sûreté qui ont été évalués lors de la demande et de l'obtention d'une autorisation de dépôt de déchets dans cette installation.

12.1.5. Critères d'acceptation des déchets pour stockage définitif

Lors de l'exploitation d'une installation de stockage définitif de déchets radioactifs, l'acceptation d'un stock donné de sources radioactives scellées retirées du service, conditionné dans des colis de déchets, est décidée en comparant les propriétés de ces déchets et de ces colis aux critères d'acceptation des déchets. Ces critères sont un outil de gestion permettant de vérifier si ce stockage est conforme aux évaluations de la sûreté et aux besoins administratifs et opérationnels de l'installation [74, 75]. Dans la pratique, les critères d'acceptation des déchets de sources radioactives scellées retirées du service, comme des autres types de déchets radioactifs, doivent être définis de manière à ce que les résultats des évaluations de la sûreté opérationnelles et post-fermeture soient conformes aux prescriptions de sûreté applicables (par exemple les contraintes de dose et/ou de risque ou les cibles). Alors que les critères génériques d'acceptation des déchets peuvent en principe être définis avant qu'une installation donnée ne soit implantée, conçue et que l'évaluation de sûreté correspondante ne soit effectuée – ces critères deviendraient alors une prescription de conception pour cette installation – les critères effectifs d'acceptation des déchets ne peuvent être établis que sur la base d'une évaluation complète de la sûreté et nécessitent la permission de l'autorité nationale de sûreté. Il convient de noter qu'en plus des critères d'acceptation des déchets définis d'après les résultats de l'évaluation de la sûreté, d'autres critères d'acceptation tiennent compte de paramètres techniques définis en fonction de la conception de l'installation, par exemple les dimensions des colis et les limites de poids, ou de critères administratifs, par exemple pour l'identification et le suivi des déchets.

Si le stockage définitif est prévu dans un dépôt en surface ou à faible profondeur, un facteur particulièrement important est la durée prévue des contrôles institutionnels, qui contribuent à la détermination de la teneur et de la concentration acceptables de radionucléides à vie plus longue dans le stock destiné au stockage définitif. Une autre considération importante est l'activité volumique des sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets et les scénarios utilisés pour évaluer la sûreté à long terme de leur stockage définitif dans une installation en surface ou à faible profondeur.

Les sources radioactives scellées retirées du service seront stockées définitivement soit dans des installations existantes, soit dans des installations nouvellement établies. Dans le premier cas, les critères d'acceptation des déchets approuvés par un organisme de réglementation pour l'installation existante détermineront les sources qui peuvent être facilement acceptés pour stockage définitif. Si les sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets constituent un flux de déchets non prévu à l'origine dans cette installation et que leurs caractéristiques ne sont pas compatibles avec les critères d'acceptation des déchets, leur acceptabilité pour stockage définitif doit alors être justifiée par une évaluation de sûreté ciblée et approuvée par l'organisme de réglementation. S'agissant des solutions de stockage définitif spécialement conçues pour ces sources, comme dans une installation de stockage en puits, il faudrait que l'évaluation de la sûreté soit compatible avec les critères d'acceptation des déchets pour permettre d'envisager leur stockage définitif. Le respect de ces critères signifie que le stockage de ces sources est en harmonie avec l'évaluation de la sûreté et que l'installation de stockage en puits assurera le confinement et l'isolement nécessaires pour protéger les personnes et l'environnement.

12.2. OPTIONS DE STOCKAGE DÉFINITIF

À l'exception de celles d'entre elles qui sont des déchets exemptés ou des DTCP, les sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets doivent être stockées définitivement dans une installation de stockage adéquate. Les options de stockage définitif de ces sources et les facteurs dont dépend le choix d'une option appropriée pour les divers types de sources sont examinés dans la publication n° 436 de la collection Rapports techniques de l'AIEA [48]. Elles sont présentées ci-dessus et les solutions de stockage définitif existantes et opérationnelles sont brièvement examinées dans les sections suivantes.

12.2.1. Stockage définitif en surface ou à faible profondeur

Des installations de stockage définitif en surface ou à faible profondeur ont été établies et fonctionnent depuis de nombreuses décennies, pour stocker définitivement des DTFA et des DFA, y compris des sources radioactives scellées retirées du service déclarées comme déchets dans la classe de déchets correspondante et dont les propriétés sont compatibles avec les critères d'acceptation des déchets. Des tranchées non aménagées sont utilisées et peuvent ne convenir qu'aux sources qui se sont désintégrées à des niveaux sûrs pendant la période de contrôle institutionnel. L'objectif est de faire en sorte qu'après cette période, aucune source radioactive présente dans le dépôt ne constitue un point chaud d'activité qui pourrait présenter un danger si le site est fouillé ou que des gens y entrent par inadvertance. Par conséquent, l'activité volumique peut être un critère limitant nécessitant un examen attentif et qui pourrait empêcher éventuellement d'accepter certaines sources radioactives scellées retirées du service et/ou des colis de déchets regroupant plusieurs sources et destinés au stockage définitif dans des installations en surface ou à faible profondeur.

Les dépôts de stockage définitif à grande échelle (généralement des milliers de mètres cubes) constitués de casemates construites en surface ou à faible profondeur (fig. 108) ont des objectifs de confinement similaires et sont également utilisés principalement pour les DTFA et les DFA. La plupart de ces déchets résultent de l'exploitation de centrales nucléaires. La conception et la fonction des dépôts en surface ou à faible profondeur sont décrites dans les références [78 à 81]. Il se peut que ces installations de stockage définitif n'acceptent pas plus les sources radioactives scellées retirées du service que les installations de stockage définitif de type tranchée. En effet, dans les cas où les barrières artificielles n'offrent pas une meilleure protection et/ou ne réduisent pas le risque d'intrusion post-institutionnelle, le



FIG. 108. DFA au Centre de stockage de l'Aube (France), une installation de stockage définitif en surface ou à faible profondeur (avec l'aimable autorisation de l'ANDRA).

scénario évaluant les conséquences de l'intrusion dans un site d'enfouissement de sources radioactives scellées retirées du service peut être le facteur dominant qui détermine les critères d'acceptation des déchets correspondants. C'est le cas lorsqu'il peut y avoir des points chauds d'activité compte tenu des propriétés des sources, de leur emballage et/ou de la stratégie de stockage définitif.

Bien que cela soit bien compris, l'argumentaire de sûreté et les caractéristiques de certains stocks de sources ont néanmoins permis à plusieurs pays exploitant des dépôts en surface ou à faible profondeur (par exemple la Slovaquie, la France et l'Espagne) de conclure qu'avec une stratégie appropriée de stockage définitif, une partie du stock de sources remplit les critères d'acceptation des déchets de ces installations.

Les DFA sont aussi stockés définitivement en surface ou à faible profondeur dans des dépôts miniers trop près de la surface pour garantir les caractéristiques de sûreté passive à long terme requises pour le stockage définitif de certains DMA et les DHA. Certains États Membres comme la Suède, la Finlande et la Norvège ont établi des installations de stockage définitif des déchets radioactifs dans de grandes cavités rocheuses à des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres, généralement dans des roches cristallines dures telles que le granit, pour le stockage définitif des DFA. Le confinement est souvent assuré dans ces dépôts par des casemates ou des silos en béton massif, avec des barrières artificielles supplémentaires telles que des remblais d'argile et d'autres structures de protection. Cela constitue une option de stockage définitif appropriée pour certaines sources radioactives scellées retirées du service d'activité plus élevée, si l'emballage est adéquat et que les concentrations d'activité conviennent aux caractéristiques de la roche hôte et du système de barrière artificielle du dépôt.

Le dépôt Richard (République tchèque) est situé dans une mine abandonnée creusée dans le calcaire et est autorisé à réceptionner des DFA. Il comprend un tunnel d'accès principal, creusé presque horizontalement à flanc de colline sur plusieurs centaines de mètres. Un certain nombre de chambres débouchant sur ce tunnel servent au stockage de déchets conditionnés dans des fûts en acier de 200 l. Des sources à courte vie et de faible activité ont été stockées définitivement dans ces chambres. Ce dépôt n'a pas accepté les sources d'AmBe, de Pu-Be ou autres dépassant les limites d'activité fixées pour un tambour de déchets [82]. Cependant, ces sources sont entreposées à l'installation dans des conteneurs spécialement conçus, en attendant leur conditionnement et leur stockage définitif ultérieur dans un dépôt géologique approprié.

Si aucun dépôt n'est disponible ou n'est susceptible de l'être dans un proche avenir pour les déchets radioactifs autres que les sources radioactives scellées retirées du service, des dispositions peuvent être prises pour le stockage définitif de ces sources dans des installations de stockage en surface ou à faible profondeur spécialement conçues pour accueillir des volumes généralement faibles de sources radioactives. Ces installations de stockage conçues spécialement pour les sources radioactives scellées retirées du service auront différents niveaux de confinement artificiel adaptés aux caractéristiques des sources radioactives qu'elles doivent contenir [48]. Ces installations de stockage en surface ou à faible profondeur conçues à cet effet peuvent ne pas convenir au stockage définitif de l'ensemble du stock, en particulier des sources radioactives scellées retirées du service de haute activité, et les décisions devront être prises sur la base d'évaluations de la sûreté, entre autres facteurs.

En Inde, le Centre de recherche atomique Bhabha exploite deux installations de ce genre pour le stockage définitif des sources scellées : le site de gestion des déchets radioactifs solides (RSMS), à Trombay, et l'installation de gestion centralisée des déchets, à Kalpakkam. Ces deux installations sont en service depuis de nombreuses années. Les sources destinées au stockage définitif sont séparées en groupes de sources similaires et les techniques de réduction du volume sont appliquées en cas de besoin. Les sources qui fuient sont colmatées et les sources les plus petites sont placées dans un récipient en acier inoxydable qui est scellé par soudage. Les sources au ^{137}Cs , au ^{60}Co et à l' ^{192}Ir et d'autres sources bêta et gamma de période inférieure à 30 ans sont systématiquement stockées définitivement.

12.2.2. Stockage géologique

Des dépôts miniers, comprenant des cavernes ou des tunnels avec différents types de barrières artificielles, sont en cours d'établissement dans de nombreux pays qui doivent gérer des déchets de l'industrie nucléaire. En outre, on peut également envisager d'utiliser les mines abandonnées et/ou les cavernes pour le stockage géologique. Dans les deux cas, il faudra démontrer qu'elles sont adéquates par un argumentaire de sûreté, et sont compatibles avec le processus réglementaire prescrit. En fonction de leur emplacement et de leur conception, ou en raison de décisions politiques, il se peut que certaines installations de stockage géologique ne puissent accueillir que des DFA ou des DMA, tandis que d'autres peuvent convenir au stockage définitif de DHA et de combustible usé déclaré comme déchets. Indépendamment de cela, le confinement assuré par tous ces dépôts [83] serait plus qu'adéquat pour le stockage définitif de tous les types de sources radioactives, ce qui signifie que les pays ayant accès à un dépôt géologique peuvent envisager d'y entreposer toutes les sources radioactives en vue d'un stockage définitif ultérieur, à condition que les prescriptions juridiques et réglementaires relatives au stock du dépôt le permettent. En effet, certains pays imposent des contraintes strictes sur les types de déchets qui peuvent être acceptés dans des dépôts particuliers, contraintes qui sont appliquées pour des raisons politiques et ne sont pas nécessairement justifiées par des considérations de sûreté et de performance.

À l'heure actuelle, il n'y a pas d'installation de stockage géologique en service pour le stockage définitif des DHA ou du combustible nucléaire usé déclaré comme déchet. Cependant, il y a des dépôts géologiques qui acceptent ou ont accepté d'autres classes de déchets radioactifs et d'autres dépôts sont attendus au cours de la prochaine décennie. Par exemple, l'installation pilote de confinement des déchets (WIPP), dans le désert de Chihuahuan, à l'extérieur de Carlsbad, Nouveau-Mexique (États-Unis d'Amérique), qui a commencé ses opérations de stockage définitif en mars 1999, est un dépôt établi dans des formations salines stratifiées à 650 mètres de profondeur. Elle a été autorisée pour le stockage définitif des déchets transuraniens provenant du programme de défense du gouvernement et de toutes les sources radioactives scellées retirées du service conditionnées contenant de l' ^{241}Am , du ^{238}Pu et du ^{239}Pu fabriquées aux États-Unis.

Un autre dépôt, l'installation de stockage géologique située dans une ancienne mine de sel à Morsleben (Allemagne), a été utilisé pour le stockage définitif de DFMA, notamment de certaines sources radioactives scellées retirées du service. Cependant, le type d'isotopes et les niveaux d'activité acceptés pour stockage définitif étaient strictement limités [82]. Un processus d'obtention de licence est actuellement en cours en vue de sceller et de fermer ce dépôt.

12.2.3. Stockage définitif en puits

Les sources radioactives retirées du service qui ne sont pas acceptables pour stockage définitif dans des dépôts en surface ou à faible profondeur, parce que leur activité spécifique initiale dépasse les critères d'acceptation ou parce qu'elles ne se décomposeront pas suffisamment pendant la période de contrôle institutionnel, peuvent convenir à un stockage définitif à une plus grande profondeur dans une installation de stockage dont le site et la conception sont appropriés. Dans les États Membres ayant des programmes nucléaires négligeables ou des ressources limitées, le stockage définitif des sources radioactives retirées du service dans des puits et des forages constitue une option prometteuse. Les déchets radioactifs solides ou solidifiés sont déposés dans une installation artificielle comprenant un puits de diamètre relativement étroit foré directement depuis la surface. D'autres concepts mettent en jeu le stockage définitif dans des puits de plus grand diamètre. La conception des installations de stockage définitif en puits et dans des forages est variable, avec des profondeurs allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres. Les diamètres peuvent varier de quelques dizaines de centimètres à plus d'un mètre [84 à 86]. Un tubage peut être installé dans le forage ou le puits et les sources seront normalement placées dans un colis entouré de matériau de remplissage (fig. 109).

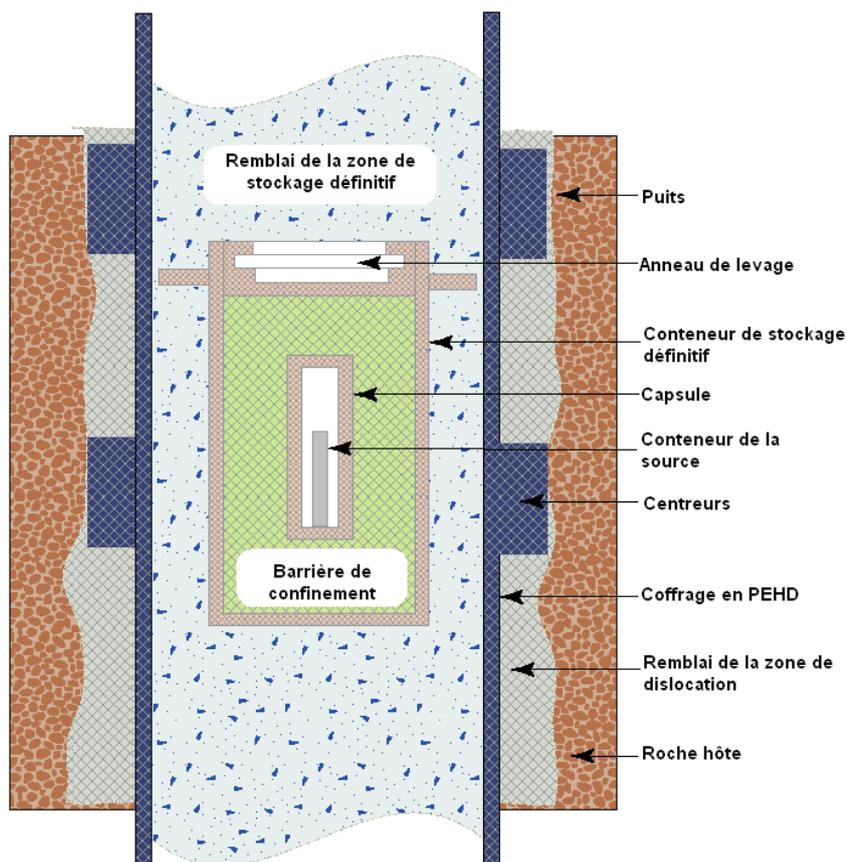


FIG. 109. Illustration schématique des éléments possibles d'un système de stockage définitif en puits.

Une installation de stockage définitif peut être constituée d'un seul puits ou d'un groupe de puits situés ou non à proximité d'autres installations nucléaires. Un stock limité de radionucléides réduit intrinsèquement les dangers potentiels pour les personnes et l'environnement. Les installations de stockage en puits présentent un certain nombre de caractéristiques positives ayant des avantages potentiels du point de vue de la sûreté des déchets et du point de vue économique, à savoir :

- isolement à long terme des personnes et de l'environnement pour de petits volumes de déchets radioactifs de haute activité spécifique dans des colis de déchets à haute intégrité ;
- accès direct et économique à un horizon géologique approprié, grâce à une technologie facilement disponible ;
- superficie et infrastructure requises limitées ;
- courtes périodes de construction et d'exploitation avant fermeture ;
- faible probabilité d'intrusion humaine et d'événements perturbateurs futurs compte tenu de la faible empreinte du puits et de la possibilité de choisir une profondeur appropriée.

Les barrières naturelles et artificielles peuvent être conçues pour assurer la sûreté à long terme au moyen de multiples fonctions de sûreté qui sont pas indûment interdépendantes. Cela peut être obtenu en s'assurant que les fonctions des barrières artificielles et naturelles dépendent de divers processus physiques et chimiques et sont assurées par des procédures de gestion de la qualité. Ainsi, la sûreté globale du système ne devrait pas être trop tributaire de la performance d'un seul composant. Le stockage définitif en puits est examiné plus en détail dans la référence [48].

Des installations de stockage définitif des déchets radioactifs en puits ont été utilisées dans un certain nombre de pays. Un bref aperçu de ces installations est présenté dans la référence [81].

Par exemple, des sources radioactives scellées retirées du service ont été stockées définitivement dans des puits creusés dans des environnements arides en zone non saturée dans l'installation de stockage à confinement maximum, au site d'essais du Nevada (États-Unis d'Amérique) et au mont Walton East (Australie) [87, 88].

Un autre exemple est celui de l'installation de stockage définitif de sources radioactives scellées retirées du service en puits en Fédération de Russie, une cuve cylindrique en acier inoxydable de 400 mm de diamètre et 1 500 mm de hauteur enfouie à 4 m de profondeur dans un puits en béton armé (fig. 110). Un mélange d'argile et de ciment a servi à remblayer le trou de construction initial dans le sol autour du mur en béton de l'installation et joue le rôle de sceau imperméable. La conception de l'installation tient compte de la chaleur maximale admissible dégagée par les sources (température d'environ 230 °C). Pour satisfaire à cette exigence, la charge maximale dans l'installation ne doit pas dépasser 1,85 PBq (50 000 Ci). « La capacité des installations en puits a été portée à 6,7 PBq (180 000 Ci) lors de l'utilisation d'un conditionnement *in situ* avec une matrice métallique. »

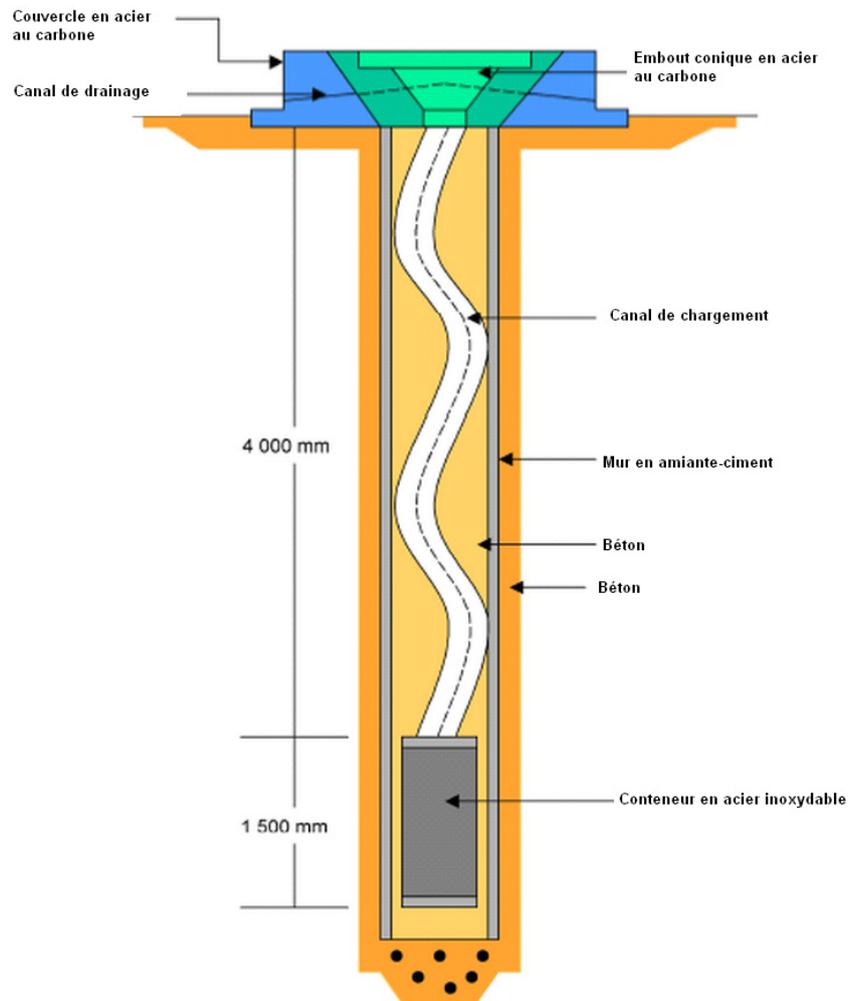


FIG. 110. Schéma d'un puits de stockage définitif de « type radon » en Fédération de Russie.

De nouvelles installations de stockage en puits sont actuellement prévues pour agrandir une installation classique de stockage en surface ou à faible profondeur, soit déjà en service, soit en phase de planification [89, 90]. En outre, l'AIEA a, en collaboration avec Necsa d'Afrique du Sud, élaboré un concept de stockage en puits spécialement conçu pour le stockage définitif sûr des sources radioactives scellées retirées du service [73, 85, 86].

Dans le cadre de ce concept (voir le schéma à la figure 111), les sources sont placées dans des puits creusés ou forés et les opérations sont effectuées directement depuis la surface. Le stockage en puits est principalement envisagé comme activité à petite échelle qu'on peut effectuer sans un programme important d'études scientifiques et de site.

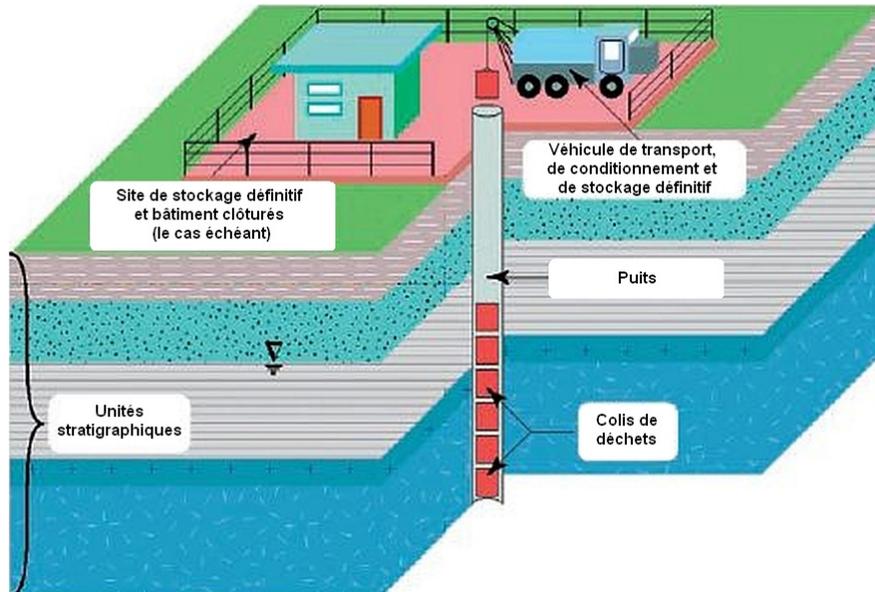


FIG. 111. Représentation schématique d'un concept et d'une installation de stockage définitif en puits.

Du point de vue des prescriptions de sûreté, le stockage définitif en puits n'est pas différent du stockage définitif en surface ou à faible profondeur ni du stockage géologique des déchets radioactifs. En effet, étant donné que l'échelle de profondeur de ce stockage est proche de celle normalement associée à ces deux types de stockage définitif, ceux-ci sont pris en considération. Comme pour le stockage en surface ou à faible profondeur et le stockage géologique, une combinaison de barrières naturelles et artificielles contribue à la sûreté du stockage définitif en puits. Ensemble, ces barrières sont conçues pour contenir des matières radioactives jusqu'à ce qu'elles se désintègrent à des niveaux insignifiants, et pour permettre un isolement et un confinement suffisants en vue d'un niveau adéquat de protection des personnes et de l'environnement [91]. La référence [91] présente des orientations sur la façon d'organiser les activités préalables au stockage définitif pour garantir la sûreté opérationnelle et post-fermeture requises (c'est-à-dire comment les prescriptions de protection et les critères associés spécifiés peuvent être satisfaits) pour une nouvelle installation de stockage en puits.

12.3. PROBLÈMES RENCONTRÉS ET ENSEIGNEMENTS TIRÉS

12.3.1. Stockage définitif en surface ou à faible profondeur

De nombreux États Membres ont mis en place des installations de stockage en surface ou à faible profondeur pour les DTFA et les DFA. Cependant, les caractéristiques particulières de nombreuses sources radioactives scellées retirées du service ne sont pas compatibles avec les critères d'acceptation des déchets établis pour les installations existantes déjà en service. Ces caractéristiques comprennent :

- Niveaux d'activité : la propriété de base des sources radioactives scellées retirées du service des catégories 1 et 2 est l'activité résiduelle élevée.

- Activité spécifique élevée : de nombreuses sources d'activité plus élevée dépassent les limites d'activité spécifique des déchets acceptables dans les installations de stockage définitif en surface ou à faible profondeur, car cela pourrait entraîner des doses de rayonnement inacceptables en cas d'intrusion humaine par inadvertance.
- Caractéristiques physiques et chimiques : les sources scellées sont certes de fabrication robuste, mais elles ne sont pas indestructibles. La forme chimique du contenu radioactif détermine le degré de dispersabilité et le potentiel de migration des radionucléides.
- Chaleur et dose : l'activité spécifique élevée d'une source de catégorie 1 peut entraîner des températures élevées localisées, ce qui peut réduire la capacité d'isolement d'une ou de plusieurs barrières.
- Production de gaz : il faut tenir compte de la production potentielle de gaz due à la radiolyse, aux produits de désintégration radioactive et à la corrosion.

Un certain nombre de sources radioactives scellées retirées du service non conditionnées mélangées à d'autres déchets ont été stockées dans des installations en surface ou à faible profondeur aux caractéristiques de site inappropriées, ce qui a entraîné de graves problèmes de sûreté dus à la forte activité et à la longue période de ces sources. Ces problèmes ont invariablement amené les autorités compétentes à envisager de retirer et de récupérer les sources de ces installations dans plusieurs pays, tels que l'Estonie, la Hongrie et la Lituanie, dans le cadre de leurs programmes de modernisation des dépôts [82].

En Lettonie, les sources radioactives scellées retirées du service ont été stockées définitivement à l'installation de radon de Baldone des années 1960 au début des années 1990. Depuis lors, le stockage définitif de ces sources n'est plus autorisé et elles sont désormais en train d'être récupérées et transférées vers une nouvelle casemate d'entreposage provisoire. Les actions futures concernant les sources radioactives scellées retirées du service déjà stockées définitivement et celles entreposées dépendront des résultats d'une évaluation de la sûreté qui permettra de déterminer si des mesures correctives s'avèrent nécessaires.

Entre 1963 et 1988, des sources radioactives scellées retirées du service ont été stockées définitivement en surface ou à faible profondeur au dépôt de Maišiagala (Lituanie). Ce dépôt a récemment été reclassé en installation d'entreposage et un projet de mise à niveau a été exécuté de 2004 à 2006. Il est prévu de récupérer ces déchets dès que le stockage géologique sera disponible.

Les argumentaires de sûreté relatifs à de nombreuses installations de stockage définitif en surface ou à faible profondeur prévoient une période de contrôle institutionnel (généralement de quelques dizaines à des centaines d'années) au cours de laquelle une intrusion humaine par inadvertance est considérée comme improbable. Cependant, même au cours de cette période et en particulier de périodes plus longues, pendant lesquelles les sources de haute activité et à longue période ne se désintègrent pas suffisamment, il est concevable que le contrôle institutionnel ne soit plus pleinement en place, et donc que l'on ne puisse pas totalement exclure une intrusion humaine par inadvertance et les dangers des rayonnements associés pour les personnes.

12.3.2. Stockage géologique

La construction d'une installation de stockage géologique coûte cher. La construction de tels dépôts serait difficile à justifier dans des pays qui n'ont que quelques sources radioactives scellées retirées du service de longue période. Les solutions possibles pourraient être de concevoir une installation appropriée de stockage en puits ou de partager les responsabilités en matière de stockage définitif à l'échelle régionale. Cette dernière suggestion soulève des questions liées à l'option de dépôts multinationaux, une question examinée plus en détail, par exemple dans la référence [92].

12.3.3. Stockage définitif en puits

Le concept de stockage définitif en puits élaboré par l'AIEA spécialement pour les sources radioactives retirées du service [73, 91] pourrait potentiellement constituer une option de stockage efficace et sûr, en particulier pour les pays dotés d'une infrastructure nucléaire limitée. Il est particulièrement prometteur pour les pays qui n'ont que des sources radioactives scellées retirées du service et n'ont pas d'installation de stockage définitif des déchets radioactifs.

Certains problèmes de sûreté associés au stockage en puits de type radon ont été atténués par le conditionnement in situ de sources nues en utilisant un alliage métallique à bas point de fusion et en introduisant le concept de récupérabilité dans la conception [93]. Prévue auparavant comme un stockage définitif, cette pratique est toutefois désormais considérée comme un entreposage.

La Fédération de Russie a également élaboré un nouveau concept de conteneur pour les sources radioactives à longue période, qui permet de récupérer les sources radioactives scellées retirées du service sous terre pour les transporter vers une installation de stockage définitif. Ce conteneur comporte un réservoir souterrain d'entreposage de sources d'un volume de 106 dm^3 et est conçu pour réceptionner des sources radioactives scellées retirées du service ayant une radioactivité totale de $3,7 \times 10^{14} \text{ Bq}$ (10 kCi).

L'installation de Novi Han (Bulgarie) a accepté des sources radioactives scellées retirées du service pour stockage définitif. Son permis d'exploitation a été suspendu en 1994 en raison de problèmes de sûreté. Par la suite, un important programme de mise à niveau a été lancé pour améliorer la sûreté du dépôt [82].

Le dépôt de Püspökszilágy (Hongrie), situé à une quarantaine de kilomètres au nord de Budapest, sur la crête d'une colline, est un autre exemple d'installation de stockage définitif en puits de sources scellées retirées du service. Les déchets ont été stockés dans un certain nombre d'unités de stockage définitif en surface ou à faible profondeur (casemates et puits) avec des barrières artificielles. Les sources radioactives scellées retirées du service à longue période placées dans les puits étaient initialement destinées à être stockées définitivement, mais l'approche a été revue et elles sont désormais considérées comme entreposées, en attendant d'être récupérées, avant leur stockage définitif dans un dépôt géologique.

13. ARGUMENTAIRE DE SÛRETÉ ET ÉVALUATION DE LA SÛRETÉ

Les prescriptions de sûreté de l'AIEA [62, 72] indiquent, entre autres, qu'un argumentaire de sûreté doit être élaboré en même temps que l'évaluation de la sûreté. Cet argumentaire est un ensemble d'arguments et de preuves scientifiques, techniques, administratifs et de gestion à l'appui de la sûreté d'une installation de stockage définitif, portant sur l'adéquation du site et la conception, la construction et l'exploitation de l'installation, l'évaluation des risques radiologiques et l'assurance de l'adéquation et de la qualité de tous les travaux liés à la sûreté associés à l'installation de stockage définitif. Partie intégrante de cet argumentaire, l'évaluation de la sûreté est guidée par une évaluation systématique des risques radiologiques et constitue un élément important de celui-ci. L'argumentaire met en jeu la quantification de la dose de rayonnement et des risques radiologiques possibles pour comparaison avec des critères de dose et de risque, et permet de comprendre le comportement de l'installation dans les conditions normales et en cas d'événements perturbateurs, compte tenu des délais pendant lesquels les déchets radioactifs restent dangereux. L'argumentaire de sûreté et l'évaluation de la sûreté visant à l'appuyer constituent la base de la démonstration de la sûreté et de l'octroi de la licence. Ils évolueront avec la mise en place de l'installation et aideront et guideront les responsables dans la prise de décisions en ce qui concerne le choix du site, la conception et l'exploitation. L'argumentaire sera également la base principale sur laquelle sera fondée le dialogue avec les parties intéressées et la confiance dans la sûreté de l'installation. Les guides de sûreté de l'AIEA [94, 95] contiennent des orientations et des recommandations sur le respect des prescriptions de sûreté en vue de l'argumentaire de sûreté et de l'évaluation de la sûreté qui l'appuie en vue non seulement de la gestion des déchets radioactifs avant leur stockage définitif, mais aussi de ce stockage.

L'évaluation de la sûreté telle qu'elle est définie dans la référence [1] est « l'évaluation de tous les aspects d'une pratique pertinents pour la protection et la sûreté ; pour une installation autorisée, ceci comprend le choix du site, la conception et l'exploitation de l'installation ». Elle joue un rôle important tout au long de la durée de vie de l'installation ou de l'activité chaque fois que des décisions concernant des questions de sûreté sont prises par les concepteurs, les constructeurs, les fabricants, l'organisme exploitant ou l'organisme de réglementation. L'élaboration et l'utilisation initiales de l'évaluation de la sûreté forment l'ossature pour l'acquisition des informations qui sont nécessaires pour démontrer que les prescriptions de sûreté pertinentes sont respectées, et pour le perfectionnement et la mise à jour de l'évaluation de la sûreté durant la durée de vie de l'installation ou de l'activité.

Des évaluations de la sûreté doivent être élaborées pour les installations et les activités servant à la gestion des sources scellées retirées du service en tant que flux de déchets particulier, y compris les activités de déclasserement, afin de démontrer que le fondement de la sûreté est adéquat et, plus particulièrement, que ces installations et ces activités seront conformes aux prescriptions de sûreté établies par l'organisme de réglementation [96]. L'évaluation de la sûreté devrait également démontrer que les emballages destinés aux sources radioactives scellées retirées du service assureront un confinement suffisant aux radionucléides dans les opérations normales et dans les incidents et les accidents postulés.

13.1. PRINCIPES D'ÉVALUATION DE LA SÛRETÉ

Les Principes fondamentaux de sûreté [28] stipulent que « l'objectif fondamental de sûreté est de protéger les personnes et l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants ». Cet objectif s'applique à toutes les installations et activités concernées par les sources radioactives scellées retirées du service et doit être atteint à toutes les étapes de leur durée de vie sans limiter indûment l'utilisation de la technologie.

Les concepteurs, l'organisme d'exploitation et l'organisme de réglementation effectuent, actualisent et utilisent l'évaluation de la sûreté notamment aux phases suivantes de la durée de vie d'une installation ou d'une activité [96] :

- a) évaluation du site de l'installation ou de l'activité ;
- b) conception ;
- c) construction de l'installation ou mise à exécution de l'activité ;
- d) mise en service de l'installation ou lancement de l'activité ;
- e) début de l'exploitation de l'installation ou de l'exécution de l'activité ;
- f) exploitation normale de l'installation ou exécution normale de l'activité ;
- g) modification de la conception ou de l'exécution ;
- h) bilans périodiques de la sûreté ;
- i) prolongation de la durée de vie de l'installation au-delà de sa durée de vie nominale initiale ;
- j) changements de propriétaire ou de la direction de l'installation ;
- k) déclassement et démantèlement de l'installation ;
- l) fermeture d'un dépôt pour le stockage définitif des déchets radioactifs et phase post-fermeture ;
- m) remédiation d'un site et levée du contrôle réglementaire.

Pour de nombreuses installations et activités, il faudra procéder à des évaluations de l'impact environnemental et des risques non radiologiques avant le début des travaux de construction ou de la mise à exécution. D'une manière générale, les évaluations de ces aspects présenteront de nombreuses similitudes avec l'évaluation de la sûreté effectuée pour parer aux risques radiologiques associés. On peut combiner ces différentes évaluations pour économiser les ressources et rendre leurs résultats plus crédibles et plus acceptables.

Les principes fondamentaux de sûreté [28] comprennent dix principes qui s'appliquent à la réalisation de l'objectif fondamental de sûreté. Cela conduit, entre autres, à la prescription relative à la réalisation d'une évaluation de la sûreté. Les relations entre les principes fondamentaux de sûreté et l'évaluation de la sûreté sont examinées en détail dans la référence [96] qui établit en outre les prescriptions généralement applicable auxquelles doit se conformer l'évaluation de la sûreté des installations et des activités, en insistant plus particulièrement sur la défense en profondeur, les analyses quantitatives et l'application d'une approche graduée pour les diverses installations et activités concernées. Cette publication aborde également la question de la vérification indépendante de l'évaluation de la sûreté que doivent effectuer les auteurs et les utilisateurs de cette évaluation. Elle se propose d'établir une base systématique et cohérente pour l'évaluation de la sûreté dans toutes les installations et activités, qui facilitera le transfert de bonnes pratiques entre les organismes qui effectuent des évaluations de la sûreté et contribuera à convaincre toutes les parties intéressées qu'un niveau de sûreté adéquat a été atteint dans les installations et les activités.

L'évaluation des besoins en matière de sûreté doit tenir compte des événements internes liés au processus (incendie d'origine interne, chute de colis de déchets, défaillance du confinement de ces colis, panne de ventilation, panne d'électricité, etc.) et des dangers externes (par exemple accidents d'aéronefs, accidents de transport hors de l'installation, séismes, tornades et incendies extérieurs).

13.2. PROCESSUS D'ÉVALUATION DE LA SÛRETÉ

La figure 112 [96] montre les principaux éléments du processus d'évaluation et de vérification de la sûreté. Ce processus, qui requiert une évaluation systématique de toutes les caractéristiques de l'installation ou de l'activité pertinentes pour la sûreté, comprend les phases suivantes :

- a) préparation de l'évaluation de la sûreté, en termes de rassemblement des compétences, des outils et des informations nécessaires à l'exécution de la tâche ;

- b) identification des risques radiologiques possibles dans des conditions de fonctionnement normal, lors d'événements de fonctionnement prévus ou de conditions accidentelles ;
- c) recensement et évaluation d'un ensemble exhaustif de fonctions de sûreté ;
- d) évaluation des caractéristiques du site en rapport avec les risques radiologiques possibles ;
- e) évaluation des dispositions relatives à la radioprotection ;
- f) évaluation des aspects techniques pour déterminer si les prescriptions de sûreté au stade de la conception applicables à l'installation ou à l'activité ont été respectées ;
- g) évaluation des aspects relatifs au facteur humain de la conception et du fonctionnement de l'installation ou de la planification et de la conduite de l'activité ;
- h) évaluation de la sûreté sur le long terme, dont il faut particulièrement se préoccuper lorsque les effets du vieillissement risquent de se faire sentir et d'affecter les marges de sûreté, les travaux de déclasserement et de démantèlement des installations et la fermeture des dépôts de déchets radioactifs.

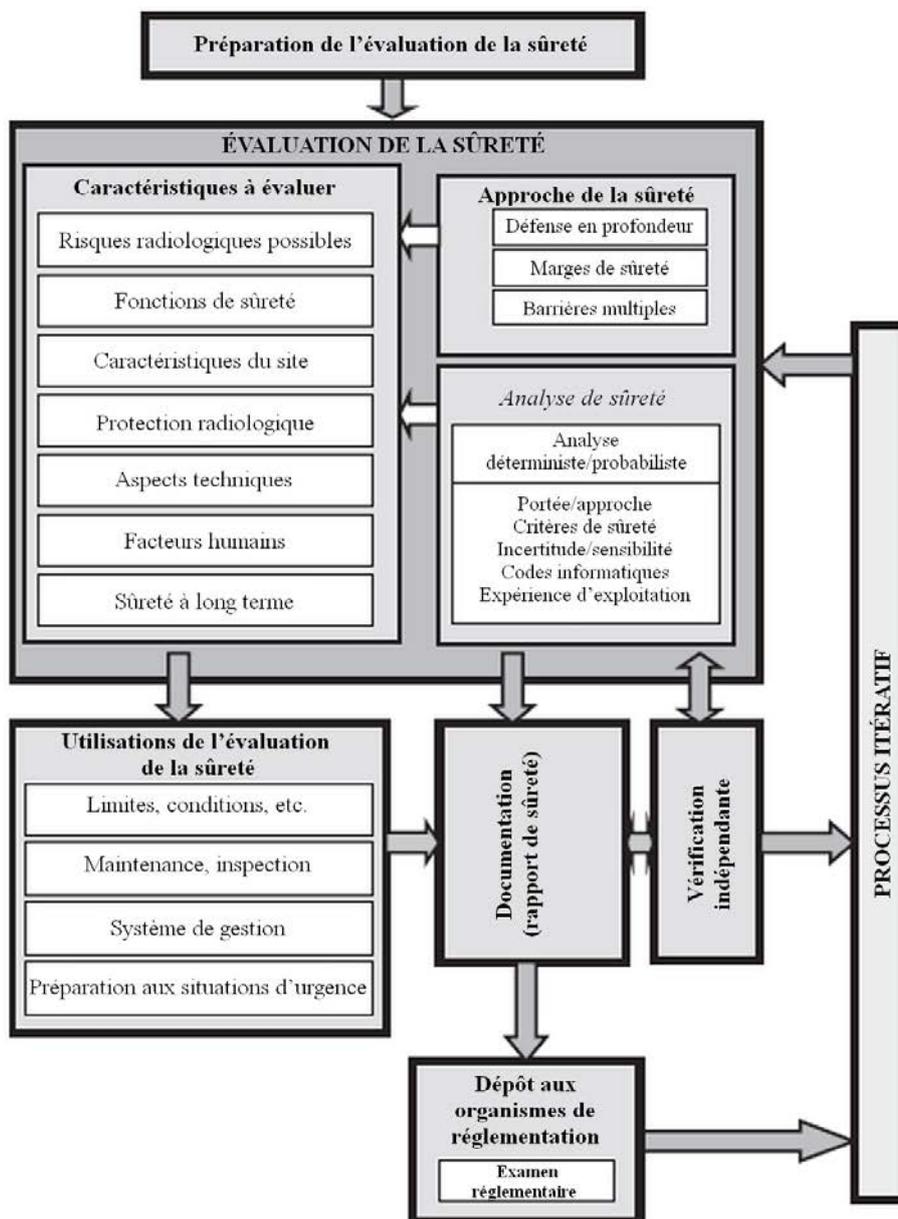


FIG. 112. Aperçu du processus d'évaluation de la sûreté [96].

L'évaluation de la sûreté devrait être effectuée en tenant dûment compte de toutes les réglementations et directives de sûreté pertinentes concernant les dangers potentiels à chaque étape de la gestion des déchets. Elle devrait couvrir toutes les opérations et les dangers inhérents associés à tous les aspects de la gestion des déchets radioactifs dans l'installation. Des évaluations de la sûreté peuvent également s'avérer nécessaires pour les pratiques de gestion des déchets hors du site, y compris le transport des déchets.

Le processus d'évaluation de la sûreté des installations et activités est, si nécessaire, répété en partie ou en totalité ultérieurement pendant la conduite des opérations afin de tenir compte des nouvelles conditions (telles que l'application de nouvelles normes ou les innovations scientifiques et technologiques), des informations issues de l'expérience d'exploitation, des modifications et des effets du vieillissement. Pour les opérations qui se poursuivent sur de longues périodes, les évaluations sont réexaminées et répétées selon que de besoin. Ces opérations ne peuvent continuer que si les résultats des réévaluations démontrent, à la satisfaction de l'organisme de réglementation, que les mesures de sûreté restent adéquates.

Dans le cas d'un dépôt contenant de grandes quantités de déchets radioactifs, les risques radiologiques pour la phase post-fermeture doivent être pris en considération. Ces risques peuvent être dus à des phénomènes progressifs – tels que la dégradation des barrières – ou à des événements ponctuels susceptibles d'influer sur l'isolement des déchets, comme une intrusion humaine par inadvertance ou des changements brusques des conditions géologiques.

L'éventail complet des caractéristiques des déchets qu'on devrait s'attendre à prendre en considération et l'impact et les effets environnementaux des opérations normales de l'installation et des conditions accidentelles potentielles devraient être examinés dans les évaluations de la sûreté. Cela signifie qu'il faudra déterminer les voies environnementales de transfert des radionucléides aux personnes ainsi que les expositions potentielles. Les valeurs des niveaux acceptables pour tous les effluents liquides et gazeux qui peuvent être normalement rejetés dans l'environnement à partir de l'installation devraient être calculées sur la base des expositions potentielles. L'adéquation de l'équipement utilisé pour surveiller et contrôler les niveaux de ces rejets devrait également être évaluée. Les évaluations de la sûreté devraient être revues de temps à autre et mises à jour si nécessaire sur la base des informations recueillies par la surveillance du lieu de travail et de l'environnement.

Des recommandations sur la préparation d'une évaluation de la sûreté pour le stockage définitif des déchets radioactifs en surface ou à faible profondeur sont présentées dans la référence [97]. Les références [86, 98] présentent un aperçu de l'évaluation de la sûreté post-fermeture et de l'élaboration d'un argumentaire de sûreté pour les installations de stockage définitif en puits. Des recommandations pour l'élaboration et l'examen des évaluations de la sûreté pour les activités de déclasserment figurent dans la référence [99].

14. CONCLUSIONS

Le présent rapport examine les différentes étapes de gestion appliquées aux sources radioactives retirées du service dans le but de donner des orientations pratiques aux États Membres pour la manutention, le conditionnement, le transport et l'entreposage de tout type de sources radioactives scellées retirées du service provenant d'applications médicales, industrielles, de recherche et d'autres applications nucléaires. Ces orientations, tout en étant conformes aux normes fondamentales de sûreté et aux prescriptions de sûreté pertinentes, ne sont qu'un moyen de répondre à ces exigences. Le lecteur est censé tenir compte des conditions réelles et des situations existantes pour rendre ses procédures et ses orientations actuelles efficaces en fonction de ses conditions et de l'infrastructure disponible.

Les conclusions tirées du présent rapport peuvent se résumer comme suit :

- a) Les applications et les caractéristiques des sources radioactives scellées utilisés en médecine, dans l'industrie et dans la recherche sont très variées. De nombreuses sources scellées portatives, pour la plupart de petite taille et de faible activité, sont utilisées dans l'industrie et en médecine. Il n'est donc pas surprenant que certaines d'entre elles soient perdues malgré la tenue d'inventaires et les contrôles. La plupart des sources scellées sont plutôt de construction solide, de sorte que les accidents impliquant des sources perdues sont d'ordinaire dus à l'erreur humaine. Les sources de haute activité ne sont pas faciles à déplacer, mais elles présentent un risque élevé de surexposition si leur gestion n'est pas appropriée.
- b) Les sources doivent être pleinement caractérisées en termes radiologiques, chimiques et physiques pour une gestion efficace. Les sources radioactives scellées non documentées sont difficiles à identifier et à caractériser. Le manuel de référence sur l'identification des sources et des dispositifs radioactifs élaboré par l'AIEA [21] pourrait être un outil efficace pour l'identification des sources scellées et des dispositifs connexes.
- c) Toutes les activités liées à l'utilisation et à la gestion des sources retirées du service devraient être couvertes par le système de réglementation. Un problème clé de contrôle de gestion est de déterminer exactement le moment où une source a été retirée du service. C'est simple si la source est remplacée ou si l'installation ferme. Cependant, le processus est souvent plus graduel (par exemple, lorsqu'une source utilisée dans la recherche est utilisée moins régulièrement). C'est à ce stade que les sources sont le plus exposées au risque de perte. Les systèmes de réglementation devraient faire la distinction entre les sources utilisées et les sources retirées du service. Une solution serait que l'utilisateur soit tenu de soumettre des rapports d'inventaire réguliers à l'organisme de réglementation avec une liste séparée de ces deux types de sources. Cela peut ne pas suffire pour conserver des traces des sources retirées progressivement du service. Une deuxième option pourrait donc être d'indiquer la date de la dernière utilisation de chaque source. Un délai peut alors être fixé, au-delà duquel toute source non utilisée est automatiquement considérée comme « retirée du service ».
- d) Il faudrait établir un système de gestion moderne, couvrant la manutention, l'emballage, la formation, l'audit, l'évaluation de la sûreté, les prescriptions réglementaires pertinentes et la tenue de registres pour toutes les étapes et tous les éléments d'une stratégie de gestion des sources radioactives scellées retirées du service.
- e) En fonction de la situation, les sources retirées du service peuvent être soit retournées au fournisseur, soit transférées à un autre utilisateur, ou encore stockées définitivement dans le pays où elles ont été utilisées ou dans un pays tiers disposé à les accepter. Malheureusement, elles sont souvent mises au rebut, causant parfois ainsi des accidents. Ces accidents, qui surviennent même dans des États Membres ayant des cadres législatifs et réglementaires appropriés, ont entraîné l'irradiation de personnes, avec parfois des conséquences fatales. Il est donc essentiel que l'organisme de réglementation soit doté des moyens nécessaires pour contrôler effectivement toutes les sources importantes dans l'État Membre et maintienne une communication efficace avec les titulaires de licences en ce qui concerne ces sources.

- f) Le retour des sources radioactives scellées retirées du service au fournisseur, tel que prévu dans la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs (réf. [13], art. 28), est, en principe, une bonne solution. Dans la pratique, cependant, il peut y avoir des difficultés dues à la législation de l'État Membre et/ou à la charge financière, ou par exemple le fournisseur peut avoir cessé ses activités ou le fabricant des sources peut ne plus exister.
- g) L'entreposage des sources retirées du service dans les installations des utilisateurs n'est pas une solution idéale des points de vue de la sûreté et de la sécurité. Il y a un certain risque de perte de contrôle des sources retirées du service entreposées chez l'exploitant. L'entreposage central de ces sources réduit la probabilité d'en perdre le contrôle. Il faudrait réduire au minimum le temps d'entreposage au niveau de l'utilisateur, et celui-ci devrait, avec l'organisme de réglementation, accorder une attention particulière au contrôle d'accès, à la sécurité, à la tenue de registres adéquats, aux responsabilités individuelles et aux contrôles ordinaires (par exemple, des tests d'étanchéité).
- h) Toute séparation requise dépend de l'installation d'entreposage et de la voie de stockage définitif finale. Il est conseillé de séparer les matériaux potentiellement recyclables ou réutilisables. La plupart des politiques de séparation sont basées sur le débit de dose (un facteur important en matière d'entreposage), l'isotope/la période et l'activité (facteurs importants pour le stockage définitif).
- i) En raison de certaines de leurs caractéristiques (activité spécifique élevée, haute activité, longue période, etc.), de nombreuses des sources retirées du service ne peuvent être stockées définitivement dans des installations en surface ou à faible profondeur. Étant donné qu'il n'y a pas encore de dépôts géologiques profonds, la seule option de gestion est l'entreposage à long terme ; une solution prometteuse pourrait être le stockage définitif en puits, un concept actuellement en cours d'élaboration. Jusqu'à ce que la situation change, les efforts devraient surtout se concentrer sur la préparation adéquate des sources qu'il faut entreposer, par un conditionnement approprié et la disponibilité d'installations d'entreposage sûr pour les sources conditionnées. Des installations de traitement des déchets centralisées desservant un certain nombre d'utilisateurs peuvent être une option de gestion économique.
- j) Les gestionnaires de déchets devraient conditionner les sources retirées du service les plus économiques à acquérir et à exploiter, et qui respectent toutes les prescriptions locales et nationales. La sélection des processus, en particulier dans les États Membres en développement, devrait être fondée sur une technologie relativement simple et robuste, facile à obtenir et à mettre à niveau et adéquate pour la gestion de ces sources. L'utilisation de capsules en acier inoxydable dont le couvercle est ensuite soudé peut être recommandée pour le conditionnement des sources à longue période étant donné qu'il faudra encore les récupérer et les reconditionner en vue de leur stockage définitif.
- k) Le démantèlement peut être nécessaire lorsque le volume disponible est limité. Il ne devrait être effectué que dans des installations où les conditions de confinement et de protection sont appropriées et par un personnel qualifié et expérimenté. Si ces installations et cette expérience ne sont pas disponibles, on peut chercher des systèmes mobiles et des équipes d'experts à l'étranger dans le cadre d'arrangements commerciaux ou de programmes d'assistance bilatérale ou internationale.
- l) Il faut déterminer la voie de stockage définitif d'une source avant de l'acheter et, si possible, passer des accords commerciaux en même temps. Même si cette approche est en train de devenir la norme, il n'y a pas de voie d'entreposage temporaire/de stockage définitif pour de nombreuses sources historiques dans de nombreux pays. On préfère généralement retourner la source au fabricant plutôt que de l'envoyer dans un entrepôt central provisoire. Dans la mesure du possible, la réutilisation ou le recyclage devraient être envisagés, mais il est peu probable que ces voies puissent être identifiées au moment de l'achat. Le retour au fabricant peut ouvrir des possibilités de recyclage.
- m) Tous les transferts de sources retirées du service dans l'installation centrale d'entreposage/de stockage définitif devraient être effectués conformément aux procédures appropriées de gestion de la qualité. Un certificat de stockage définitif de la source devrait être délivré à l'expéditeur par l'exploitant de l'installation centrale pour confirmer le transfert de responsabilité.

RÉFÉRENCES

- [1] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Glossaire de sûreté de l'AIEA : Terminologie employée en sûreté nucléaire et radioprotection, Édition de 2007, AIEA, Vienne (2007).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nature and Magnitude of the Problem of Spent Radiation Sources, IAEA-TECDOC-620, IAEA, Vienna (1990).
- [3] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, L'accident radiologique de Goiânia, AIEA, Vienne (1990).
- [4] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, L'accident radiologique de San Salvador, AIEA, Vienne (1991).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Tammiku, IAEA, Vienna (1998).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Yanango, IAEA, Vienna (2000).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Gilan, IAEA, Vienna (2002).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Samut Prakarn, IAEA, Vienna (2002).
- [9] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Loss of an Iridium-192 Source and Therapy Misadministration at Indiana Regional Cancer Center, Indiana, Pennsylvania, on November 16, 1992, NUREG-1480, NRC, Washington, DC (1993).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Lilo, IAEA, Vienna (2000).
- [11] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté, Édition provisoire, n° GSR Part 3 (Interim) de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2011).
- [12] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINE DE LA SANTÉ, Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements, n° 115 de la collection Sécurité, AIEA, Vienne (1997).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, IAEA International Law Series No. 1, IAEA, Vienna (1997).
- [14] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives, AIEA, Vienne (2004).
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling, Conditioning and Storage of Spent Sealed Radioactive Sources, IAEA-TECDOC-1145, IAEA, Vienna (2000).
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Conditioning and Interim Storage of Spent Radium Sources, IAEA-TECDOC-886, Vienna (1996).
- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Spent High Activity Radioactive Sources (SHARS), IAEA-TECDOC-1301, IAEA, Vienna (2002).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Disused Long Lived Sealed Radioactive Sources (LLSRS), IAEA-TECDOC-1357, IAEA, Vienna (2003).
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methods to Identify and Locate Spent Radiation Sources, IAEA-TECDOC-804, IAEA, Vienna (1995).
- [20] FÖLDIAK, G. (Ed.), Industrial Application of Radioisotopes, Akadémiai Kiadó, Budapest (1986).
- [21] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Identification des sources et des dispositifs radioactifs, Orientations techniques, n° 5 de la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA, AIEA, Vienne (2009).
- [22] ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION, Radioprotection — Sources radioactives scellées — Méthodes d'essai d'étanchéité, ISO 9978 :1992, ISO, Genève (1992).
- [23] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Catégorisation des sources radioactives, n° RS-G-1.9 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2011).
- [24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Categorization of Radioactive Sources, IAEA-TECDOC-1344, IAEA, Vienna (2003).
- [25] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Sécurité des sources radioactives, n° 11 de la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA, AIEA, Vienne (2012).

- [26] ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION, Sources radioactives scellées — Classification, ISO 2919 :1980, ISO, Genève (1980).
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources : A Safety Fundamental, Safety Series No. 120 (1996).
- [28] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MARITIME INTERNATIONALE, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINNE DE LA SANTÉ, PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, Principes fondamentaux de sûreté, n° SF-1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2007).
- [29] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Cadre gouvernemental, législatif et réglementaire de la sûreté, n° GSR Part 1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2010).
- [30] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Sûreté des générateurs de rayonnements et des sources radioactives scellées, n° RS-G-1.10 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2008).
- [31] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Contrôle réglementaire des sources de rayonnements, n° GSG1.5 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2011).
- [32] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Système de gestion des installations et des activités, n° GS-R-3 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2011).
- [33] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.1, IAEA, Vienna (2006).
- [34] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, L'assurance de la qualité pour la sûreté des centrales nucléaires et autres installations nucléaires, Code et guides de sûreté Q1–Q14, n° 50-C/SG-Q de la collection Sécurité, AIEA, Vienne (1999).
- [35] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for the Processing, Handling and Storage of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards No. GS-G-3.3, IAEA, Vienna (2008).
- [36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.4, IAEA, Vienna (2008).
- [37] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, BUREAU DE LA COORDINATION DES AFFAIRES HUMANITAIRES DE L'ONU, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINNE DE LA SANTÉ, Préparation et intervention en cas de situation d'urgence nucléaire ou radiologique, n° GSR-2 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2004).
- [38] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Méthode d'élaboration de mesures d'intervention en cas de situation d'urgence nucléaire ou radiologique (Mise à jour du document IAEA-TECDOC-953), collection Préparation et intervention en cas de situation d'urgence, EPR-METHOD 2003, Vienne (2009).
- [39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards No. GS-G-2.1, Vienna (2007).
- [40] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Recommandations de sécurité nucléaire relatives aux matières radioactives et aux installations associées, n° 14 de la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA, AIEA, Vienne (2011).
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Surveillance and Monitoring of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, Safety Reports Series No. 35, IAEA, Vienna (2004).
- [42] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Contrôle radiologique de la contamination radioactive des surfaces, n° 120 de la collection Rapports techniques, AIEA, Vienne (1971).
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Strengthening Control over Radioactive Sources in Authorized Use and Regaining Control over Orphan Sources. National strategies, IAEA-TECDOC-1388, IAEA, Vienna (2004).
- [44] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Système d'information pour les autorités de réglementation (RAIS) - logiciel et guide d'utilisation, version 2.0, AIEA, Vienne (1999) (en anglais seulement).
- [45] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Déclassement des installations médicales, industrielles et de recherche, n° WS-G-2.2 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2004).
- [46] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Stratégie nationale visant à la reprise de contrôle des sources orphelines et au renforcement du contrôle des sources vulnérables, n° SSG-19 de la collection Sécurité de l'AIEA, AIEA, Vienne (2015).

- [47] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Règlement de transport des matières radioactives, édition de 2012, n° SSR-6 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2013).
- [48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Disposal Options for Disused Radioactive Sources, Technical Reports Series No. 436, IAEA, Vienna (2005).
- [49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Developing Multinational Radioactive Waste Repositories : Infrastructural Framework and Scenarios of Cooperation, IAEA-TECDOC-1413, IAEA, Vienna (2004).
- [50] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009).
- [51] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Infrastructure législative et gouvernementale pour la sûreté nucléaire, la sûreté radiologique, la sûreté des déchets radioactifs et la sûreté du transport, n° GS-R-1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2004).
- [52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Review of the Factors Affecting the Selection and Implementation of Waste Management Technologies, IAEA-TECDOC-1096, IAEA, Vienna (1999).
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Locating and Characterizing Disused Sealed Radioactive Sources in Historical Waste, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.17, IAEA, Vienna (2008).
- [54] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Catalogue international des sources radioactives scellées et des dispositifs connexes, AIEA, Vienne (2004) (en anglais seulement).
- [55] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Characterization of Radioactive Waste Forms and Packages, Technical Reports Series No. 383, IAEA, Vienna (1997).
- [56] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization, IAEA-TECDOC-1537, IAEA, Vienna (2007).
- [57] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials, IAEA-TECDOC-855, IAEA, Vienna (1996).
- [58] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Principes pour l'exemption de contrôle réglementaire de sources et de pratiques pouvant entraîner une radioexposition, n° 89 de la collection Sécurité, AIEA, Vienne (1989).
- [59] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).
- [60] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Reference Design for a Centralized Spent Sealed Sources Facility, IAEA-TECDOC-806, IAEA, Vienna (1995).
- [61] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Interim Storage of Radioactive Waste Packages, Technical Reports Series No. 390, IAEA, Vienna (1998).
- [62] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Gestion des déchets radioactifs avant stockage définitif, n° GSR Part 5 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2010).
- [63] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Radioactive Waste : Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-6.1, IAEA, Vienna (2006).
- [64] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development of Specifications for Radioactive Waste Packages, IAEA-TECDOC-1515, IAEA, Vienna (2006).
- [65] ARUSTAMOV, A.E., OJOVAN, M.I., SEMENOV, K.N., SOBOLEV, I.A., Preparation of radium and other spent sealed sources containing long-lived radionuclides to long-term storage (Proc. WM'03 Conf. Tucson, 2003), (2003) CD-ROM.
- [66] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, IAEA, Vienna (2009).
- [67] OJOVAN, M.I., et al., An Introduction to Nuclear Waste Immobilization, Elsevier, Amsterdam (2005).
- [68] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Radiation Sources and Security of Radioactive Materials (Proc. Int. Conf. Dijon, 1998), IAEA, Vienna (1999).
- [69] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Radioactive Waste Management (Proc. Int. Conf. Córdoba, 2000), IAEA, Vienna (2000).
- [70] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Issues and Trends in Radioactive Waste Management (Proc. Int. Conf. Vienna, 2002), IAEA, Vienna (2003).
- [71] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Security of Radioactive Sources (Proc. Int. Conf. Vienna, 2003), IAEA, Vienna (2003).
- [72] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Stockage définitif des déchets radioactifs, n° SSR-5 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2011).

- [73] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, BOSS : Borehole Disposal of Disused Sealed Sources. A Technical Manual, IAEA-TECDOC-1644, IAEA, Vienna (2011).
- [74] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories (Proc. Workshop Aix-en-Provence, 1991), OECD, Paris (1992).
- [75] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Microbial Degradation of Low-Level Radioactive Waste, Rep. NUREG/CR-6341, Office of Standards Development, NRC, Washington, DC (1996).
- [76] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal (Proc. Workshop Reims, 2000), OECD, Paris (2001).
- [77] EUROPEAN COMMISSION, PROGRESS Project : Research into Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Repository Systems. Final Report, Rep. EUR 19133 EN, EC, Luxembourg (2000).
- [78] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Considerations in the Development of Near Surface Repositories for Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 417, IAEA, Vienna (2003).
- [79] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1256, IAEA, Vienna (2001).
- [80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and Technical Basis for the Near Surface Disposal of Low and Intermediate Level Waste, Technical Reports Series No. 412, IAEA, Vienna (2002).
- [81] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Considerations in the Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources in Borehole Facilities, IAEA-TECDOC-1368, IAEA, Vienna (2003).
- [82] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Upgrading of Near Surface Repositories for Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 433, IAEA, Vienna (2005).
- [83] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Issues Relating to Safety Standards on the Geological Disposal of Radioactive Waste (Proc. Mtg Vienna, 2001), IAEA-TECDOC-1282, IAEA, Vienna (2002).
- [84] PROZOROV, L., TKATCHENKO, A., TITKOV, V., KORNEVA, S., Prospects of Large Diameter Well Construction at 'Radon' Sites, HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration — Working Towards a Cleaner Environment, Waste Management 0,1, Tucson (2001).
- [85] VAN BLERK, J.J., VIVIER, J.J.P., PIROW, P., ANDREOLI, M.A.G., HEARD, R.G., The Borehole Disposal Concept for Spent Sources, Volume I : Development and Evaluation of the Concept, NECSA Rep. GEA-1353 (NWS-RPT-00\013), NECSA, Pretoria (2000).
- [86] KOZAK, M.W., STENHOUSE, M.J., VAN BLERK, J.J., The Borehole Disposal of Spent Sources, Volume II : Preliminary Safety Assessment of the Disposal Concept, NECSA Rep. GEA-1353 (NWS-RPT-00\013), NECSA, Pretoria (2000).
- [87] COCHRAN, J.R., et al., Compliance Assessment Document for the Transuranic Wastes in the Greater Confinement Disposal Boreholes at the Nevada Test Side, Vol. 2 : Performance Assessment, Rep. Sand 2001-2977, Sandia National Laboratories, NM (2001).
- [88] HARTLEY, B.M., et al., "The establishment of a radioactive waste disposal facility in Western Australia for low level waste", Nuclear Energy, Science and Technology (Proc. 9th Pacific Basin Nucl. Conf. Sydney, 1994), AE Conventions Pty Ltd, Canberra (1994).
- [89] ANGUS, M.J., CRUMPTON, C., MCHUGH, G., MORETON, A., ROBERTS, P.T., Management and Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources in the European Union, European Commission Rep. EUR-18186EN, EC, Brussels (2000)
- [90] EUROPEAN COMMISSION, Management of Spent Sealed Radioactive Sources in Central and Eastern Europe (Czech Rep., Estonia, Hungary, Poland and Slovenia), Report EUR-19842EN, EC, Brussels (2001)
- [91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Borehole Disposal Facilities for Radioactive Wastes, IAEA Safety Standards Series No. SSG-1, IAEA, Vienna (2009).
- [92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical, Institutional and Economic Factors Important for Developing a Multinational Radioactive Waste Repository, IAEA-TECDOC-1021, IAEA, Vienna (1998).
- [93] OJOVAN M.I., DMITRIEV S.A., SOBOLEV I.A., "Long-term storage and disposal of spent sealed radioactive sources in borehole type repositories", Waste Management '03 (Proc. Int. Conf. Tucson, 2003), CD-ROM, p.11.
- [94] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-3, IAEA, Vienna (2013).
- [95] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, IAEA (2012).
- [96] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Évaluation de la sûreté des installations et activités : prescriptions générales de sûreté, n° GSR Part 4 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2009).

- [97] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Évaluation de la sûreté du stockage en surface ou sub-surface des déchets radioactifs, n° WS-G-1.1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2004).
- [98] OJOVAN M.I., GUSKOV A.V., PROZOROV L.B., ARUSTAMOV A.E., POLUEKTOV P.P., SEREBRIAKOV B.E., Safety assessment of bore-hole repositories for sealed radiation sources disposal, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 608, (2000) 141–146.
- [99] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment for the Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-5.2, IAEA, Vienna (2008).

ABRÉVIATIONS

ALARA	aussi bas que raisonnablement possible
AND	analyse non destructive
DFA	déchet de faible activité
DHA	déchet de haute activité
DMA	déchet de moyenne activité
DTCP	déchet à très courte période
GTR	générateurs thermoélectriques à radio-isotopes
HDR	haut débit de dose
ISO	Organisation internationale de normalisation
LDR	faible débit de dose
NFI	Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté
RAIS	Système d'information pour les autorités de réglementation

Annexe

RISQUES ASSOCIÉS AUX SOURCES RETIRÉES DU SERVICE

La présente annexe examine les dangers, en particulier les dangers radiologiques, associés aux sources radioactives scellées retirées du service.

Les accidents les plus graves impliquant ces sources se sont produits lorsqu'elles se sont retrouvées dans les mains de non-professionnels qui ne savaient pas qu'il s'agissait de matières radioactives, car l'équipement ou les porte-sources contenant les sources retirées du service peuvent ressembler à de la ferraille normale (voir figure A-1). La perte de contrôle des sources radioactives scellées retirées du service peut également entraîner des risques de perte, de vol ou de détournement des sources. Une nouvelle dimension du danger potentiel des sources retirées du service est qu'elles peuvent être volées intentionnellement à des fins d'utilisation malveillante ou de trafic illicite.

Les accidents enregistrés dans le passé ont démontré que les rayonnements, de par leur nature et leur histoire, ont une capacité unique à déclencher la peur et l'anxiété dans la population générale. La quantité de matières radioactives nécessaire pour avoir des conséquences économiques n'a pas besoin d'être importante ; même une petite quantité peut avoir d'énormes effets psychologiques. La mise en œuvre de mesures de sécurité appropriées peut réduire la probabilité que de telles situations se produisent.

A-1. CARACTÉRISTIQUES DONT DÉPENDENT LES DANGERS ASSOCIÉS AUX SOURCES RETIRÉES DU SERVICE

Dans le cas des sources radioactives scellées retirées du service, les conséquences d'un accident peuvent inclure un ou plusieurs des éléments suivants [A-1] :

- contamination interne et/ou externe de personnes et lésions associées aux rayonnements (par exemple érythème, lésions tissulaires, amputation et même décès) en raison d'une exposition excessive des sujets ;
- contamination des matériaux ou de l'environnement due à la rupture de la capsule et dispersion du contenu radioactif des sources scellées (destruction de la capsule, fusion avec la ferraille, etc.) ;
- pertes économiques dues aux traitements médicaux, à la surveillance radiologique liée à l'accident, à la décontamination, au démantèlement, à la gestion et au stockage définitif des déchets, ainsi qu'aux coûts liés à la perte de capacité de production, à l'indemnisation monétaire des personnes surexposées, aux dépenses sociales et à l'impossibilité d'utiliser la source elle-même.

En termes généraux, le risque est la chance ou la probabilité qu'une personne subisse un préjudice ou un effet sanitaire nocif si elle est exposée à un danger, et est fonction de la probabilité (d'un certain événement) et des conséquences (ampleur des effets néfastes) de cet événement. Les risques associés à l'exposition aux sources radioactives scellées retirées du service dépendent des caractéristiques de celles-ci, de l'environnement dans lequel elles se trouvent et des actions des personnes impliquées. Les sources radioactives contenant des radionucléides à longue période, comme l'²⁴¹Am ou le ²²⁶Ra, seront toujours potentiellement dangereuses après des milliers d'années. À l'inverse, les radio-isotopes à courte période deviennent sûrs beaucoup plus rapidement. Une décroissance de dix périodes diminue l'activité d'un facteur d'environ 1 000. Une source de thérapie au ⁶⁰Co ayant une activité initiale de 100 TBq se désintègrera à un niveau plus sûr après 100 ans, tandis qu'il faudra 600 ans à une source au ¹³⁷Cs et seulement quatre ans à une source de radiographie à l'¹⁹²Ir de la même activité pour se désintégrer au même niveau d'activité.

Les conséquences d'un accident mettant en jeu l'exposition à une source radioactive scellée sont directement proportionnelles à son activité [A-2]. Pour une source émettant des rayonnements alpha ou

bêta, les dommages causés par la manutention d'une source d'un kBq seraient indétectables, mais une source similaire d'un TBq pourrait avoir des conséquences mortelles (à noter qu'on parle de sources émettant des rayonnements bêta et/ou gamma uniquement).



FIG. A-1. Équipements hors service contenant des sources retirées du service.

A-2. EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS

L'impact de toute exposition aux rayonnements dépend du type de rayonnement associé à la source. Lorsque le rayonnement ionisant transmet de l'énergie aux tissus vivants, des dommages sont susceptibles de se produire. Plus l'intensité du rayonnement incident est élevée, plus les dommages sont importants. C'est donc le transfert ou le dépôt d'énergie dans les tissus vivants qui détermine l'étendue des dommages subis par les tissus et, par conséquent, des lésions. L'ionisation des tissus peut être une conséquence directe de ce phénomène, comme c'est le cas avec les rayonnements alpha et bêta, ou une conséquence indirecte, comme c'est le cas avec les rayons gamma et les neutrons. Alors que le rayonnement alpha a une caractéristique d'ionisation spécifique élevée, sa pénétration est très limitée.

Les caractéristiques d'ionisation du rayonnement gamma et des faisceaux de neutrons dépendent de leur énergie. Les sources de neutrons (par exemple Am-Be, Ra-Be, Pu-Be) doivent être manipulées avec beaucoup de précaution, car les neutrons qu'elles émettent constituent un type de rayonnement plus dangereux. En outre, lorsqu'ils sont absorbés par le milieu ambiant, les neutrons peuvent induire une radioactivité artificielle.

Pour les effets déterministes (non stochastiques) sur la personne humaine, il existe des doses seuils en deçà desquelles les effets spécifiques ne sont pas apparents. Une exposition de l'organisme entier peut être fatale au-dessus de 3 Sv et, au-dessus de 7 Sv, est certainement fatale. Si seule une partie de l'organisme est exposée, la personne peut survivre à des doses plus élevées, mais les dommages peuvent être si graves qu'il faudra peut-être enlever la partie exposée. Le système de catégorisation des sources de l'AIEA [A-3] est basé sur les effets déterministes.

Les sources de catégorie 1 pourraient, si elles ne sont pas gérées de manière sûre ou bien protégées, provoquer des lésions permanentes à la personne qui les a manipulées ou qui a été en contact avec elles d'une quelconque autre manière pendant plus de quelques minutes. Rester à proximité immédiate de ces matières, lorsqu'elles ne sont pas protégées, pendant une période de quelques minutes à une heure, pourrait être fatal.

Les sources de catégorie 2 pourraient, si elles ne sont pas gérées de manière sûre ou bien protégées, provoquer des blessures permanentes à la personne qui les a manipulées ou qui a été en contact avec elles d'une quelconque autre manière pendant une courte période (allant de quelques minutes à des heures). Rester à proximité de ces matières non protégées pendant une période allant de quelques heures à des jours pourrait être fatal.

Les sources de catégorie 3 pourraient, si elles ne sont pas gérées de manière sûre ou bien protégées, provoquer des lésions permanentes à la personne qui les a manipulées ou qui a été en contact avec elles d'une quelconque autre manière pendant plusieurs heures. Il est très peu probable qu'une personne à proximité immédiate soit exposée pendant plus de deux heures à des distances aussi courtes.

Pour les effets stochastiques, principalement l'induction d'un cancer et les effets génétiques, il n'y a pas de seuil ; le risque d'effet est considéré comme proportionnel à la dose. Le risque d'induction d'un cancer potentiellement mortel est de 2 à 4×10^{-2} par Sv, tandis que pour les effets héréditaires graves, le risque est plus faible, d'environ 10^{-2} par Sv. Les effets des rayonnements ionisants sur les personnes et l'environnement sont examinés plus en détail dans les références [A-4 à A-8].

La durée, la distance et la protection sont les éléments clés de la radioprotection et de la minimisation de l'exposition, et le risque radiologique est lié à ces mêmes paramètres. L'exposition aux rayonnements peut causer plus de dommages si elle dure plus longtemps, à une distance plus faible et avec un matériau de protection plus réduit entre la source et le sujet. Avec ces facteurs, il est difficile qu'un grand nombre de personnes subissent des dommages graves, car beaucoup de gens peuvent difficilement se trouver à proximité immédiate d'une source pendant une longue période, et le corps humain lui-même fournit une certaine protection, de sorte qu'une foule fait quelque peu écran à une source radioactive. Une seule source, même de grande taille, peut ne pas avoir d'effets psychosociaux ou économiques majeurs ou durables.

Dans le cas d'une source endommagée, l'effet sur l'environnement peut être la contamination des bâtiments et de la zone de son emplacement en général. Étant donné l'activité spécifique élevée de la matière radioactive contenue dans les sources scellées, la diffusion de faibles quantités, de l'ordre de quelques microgrammes, de son contenu dans l'environnement, peut entraîner un risque important pour les personnes, limitant ainsi l'utilisation de bâtiments et de zones potentiellement contaminés. La décontamination peut coûter très cher. Les accidents impliquant des sources retirées du service ont déjà entraîné une forte contamination de l'environnement et des coûts élevés pour les travaux de décontamination associés.

A-3. DANGERS TOXIQUES DES SOURCES RADIOACTIVES

Il serait difficile d'empoisonner un grand nombre de personnes avec les radionucléides contenus dans des sources scellées pour obtenir des effets sanitaires à court terme, car dans les aliments, par exemple, les matières radioactives doivent être assez fortement concentrées pour avoir un effet déterministe sur un sujet. Les bactéries peuvent causer beaucoup plus de dommages. Pour toucher un grand nombre de gens, il faut donc une très grande quantité de matières. Des matières radioactives solubles pourraient

être introduites dans les réservoirs d'eau, mais avec presque n'importe quel nombre plausible de sources radioactives, elles seraient trop diluées pour avoir un impact sanitaire important. Elles pourraient être introduites plus près du point de consommation, mais le nombre de personnes touchées serait alors faible. Il est possible qu'une attaque par empoisonnement puisse déclencher une certaine méfiance à l'égard des aliments ou de l'eau consommés mais, étant donné que les épidémies de maladies transmises par les aliments et l'eau sont relativement fréquentes, elles sont quelque peu familières. Il est également possible que si un réservoir était contaminé par des matières radioactives, les consommateurs exigeraient qu'il soit nettoyé, même si ces matières n'avaient aucune incidence sur la sûreté de l'eau dans les habitations. Un tel nettoyage pourrait être coûteux, mais une telle opération ne viserait plus à empoisonner mais serait une attaque de dispersion radiologique de type déni d'utilisation de ressources.

A-4. RÔLE DE LA CONCEPTION DE LA SOURCE

De nombreuses applications de sources radioactives nécessitent que l'activité soit concentrée dans un très petit volume (*source ponctuelle*) ou approximativement le long d'une ligne (*source linéaire*). Le volume de matière radioactive est généralement de l'ordre du centimètre cube ou de quelques millimètres cubes, ce qui signifie que les sources sont de très petites tailles, même si le volume total augmente du fait de l'encapsulation.

La matière utilisée pour l'encapsulation est généralement de l'acier inoxydable, mais le platine, le titane, l'aluminium ou d'autres matières sont également utilisées. Des capsules en or, en laiton, en argent et même en verre ont été utilisées dans les premières sources au ^{226}Ra . Des sources au radium protégées par des capsules en métaux précieux ont été volées pour leur valeur monétaire, causant de nombreux accidents.

Les anciennes sources (en particulier les anciennes sources au radium) étaient fabriquées selon des normes inférieures à celles qui seraient acceptables aujourd'hui. La substance radioactive contenue dans ces sources était soit une poudre, soit un sel soluble, lesquels se dispersent facilement lorsque la capsule est endommagée.

A-5. QUELQUES ACCIDENTS/INCIDENTS AYANT MIS EN JEU DES SOURCES RETIRÉES DU SERVICE

Bien souvent, les sources retirées du service et leurs conteneurs sont collectées par des non-professionnels en tant que ferraille de valeur. Ce genre de situation peut s'avérer extrêmement dangereuse. Ainsi, l'abandon par inadvertance d'un dispositif de téléthérapie au ^{137}Cs [A-9] a provoqué un accident à Goiânia (Brésil) en 1987. Celui-ci s'est produit lorsqu'un institut privé de radiothérapie de la ville a déménagé dans de nouveaux locaux en laissant derrière ce dispositif sans en informer l'autorité de délivrance des licences comme l'exige son autorisation. Les anciens locaux ont ensuite été partiellement démolis et le dispositif de téléthérapie n'était donc plus sécurisé. Deux personnes sont entrées dans les locaux et, ignorant ce qu'était ce dispositif, mais pensant qu'il pouvait avoir de la valeur comme métal de récupération, ont détaché l'assemblage de la source radioactive de la tête d'irradiation et l'ont ramené à la maison où la capsule de la source s'est rompue. Par la suite, les restes de l'assemblage ont été vendus à un parc à ferrailles. Quatorze personnes ont été gravement contaminées, dont quatre sont décédées et les autres ont survécu après un traitement intensif. Il a fallu soumettre plus de 12 000 personnes à un contrôle radiologique approfondi, et une contamination interne ou externe avait été détectée chez 249 d'entre elles. L'environnement a été gravement contaminé. Au total, 3 500 m³ de déchets contaminés ont été ramassés pour assainir la zone contaminée et il a fallu une coopération internationale pour atténuer les conséquences de cet accident. Les coûts directs de l'opération de décontamination et de la construction de deux casemates d'entreposage en béton pour les déchets sont estimés à 15 millions de dollars.

Un autre accident ayant mis en jeu des sources scellées retirées du service s'est produit en 1997 en Géorgie [A-10], où 11 militaires avaient contracté une maladie cutanée induite par des rayonnements. Cet accident était principalement dû à l'abandon abusif et non autorisé de 12 sources radioactives au ^{137}Cs précédemment utilisées par l'armée.

Le troisième exemple est celui de l'accident qui s'est produit en Estonie en 1994, lorsque trois personnes se sont introduites dans une installation de stockage définitif de déchets non gardée, ont enlevé une source au ^{137}Cs et l'ont ramenée à la maison [A-2]. Cet accident a entraîné le décès d'une personne et la contamination de plusieurs autres membres de la famille, dont certains ont subi des brûlures cutanées induites par les rayonnements.

D'autres accidents sont liés à la fonte de sources retirées du service dans l'industrie du recyclage de la ferraille. Il y a eu de nombreux cas dans le monde entier, où des matières radioactives ont été involontairement fondues pendant le recyclage de ferraille.

Lors d'un seul accident survenu au Mexique en 1983, une source de téléthérapie au ^{60}Co a été fondue dans une fonderie du nord du pays. Les barres d'acier contaminées produites ont été utilisées pour la construction civile dans ce pays et aux États-Unis d'Amérique, entraînant la contamination de plusieurs milliers de personnes et la démolition de plusieurs maisons contaminées. Un accident similaire s'est produit en Europe en 1998, lorsqu'une source au ^{137}Cs a été fondue dans une usine métallurgique du sud de l'Espagne. La contamination aérienne qui en a résulté s'est propagée pendant des jours jusqu'à ce qu'elle soit détectée dans le sud de la France, en Suisse, en Italie et le sud de l'Allemagne. L'usine sidérurgique et les deux usines de traitement qui ont reçu les matières incinérées ont également été contaminées. Le Conseil de sécurité nucléaire espagnol a ordonné la fermeture de ces usines jusqu'à ce que des mesures de décontamination soient mises en œuvre.

A-6. ÉTAPES PRATIQUES POUR MINIMISER LES RISQUES

Les éléments d'infrastructure ayant trait à la réduction des risques liés à la gestion des sources radioactives scellées retirées du service, au niveau de l'exploitant des déchets, peuvent se résumer comme suit [A-1] :

- Très bonne connaissance du modèle et des caractéristiques des sources apportées à l'installation pour conditionnement ou entreposage. Cela suppose une bonne documentation et la description technique de tous les types de sources importées dans le pays.
- Personnel formé et expérimenté (formation initiale et périodique y compris dans les domaines suivants : radioprotection, procédures d'exploitation, aspects pratiques des soins de santé et de la sûreté, caractéristiques des sources, prescriptions réglementaires, procédures de contrôle de gestion, prescriptions en matière de documentation).
- Licence (y compris le respect de toutes les prescriptions de l'autorité compétente).
- Système de gestion (y compris les procédures écrites, la surveillance, les mesures de sécurité, la planification pour les situations d'urgence).
- Audit régulier (interne et/ou externe).

RÉFÉRENCES POUR L'ANNEXE

- [A-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management for the Prevention of Accidents from Disused Sealed Radioactive Sources, IAEA-TECDOC-1205, IAEA, Vienna (2001).
- [A-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Tammiku, IAEA, Vienna (1998).
- [A-3] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Catégorisation des sources radioactives, n° RS-G-1.9 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2011).
- [A-4] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINNE DE LA SANTÉ, Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements, n° 115 de la collection Sécurité, AIEA, Vienne (1997).
- [A-5] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, Ionizing Sources : Sources and Biological Effects, 1982 Report, UNSCEAR, New York (1982).
- [A-6] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 1988 Report, UNSCEAR, New York (1988).
- [A-7] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Recommandations 1990 de la Commission internationale de protection radiologique, Publication 60 de la CIPR, Ann. ICRP, **21** (1993) 1-3.
- [A-8] COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE, Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique, Publication 103 de la CIPR, Ann. CIPR (2009).
- [A-9] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, L'accident radiologique de Goiânia, AIEA, Vienne (1990).
- [A-10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Lilo, IAEA, Vienna (2000).

PERSONNES AYANT COLLABORÉ À LA RÉDACTION ET À L'EXAMEN

Ali, Q.	PAEC (Pakistan)
Balla, J.	Agence internationale de l'énergie atomique
Beer, H.-F.	Institut Paul Scherrer (Suisse)
Benitez-Navarro, J.C.	Agence internationale de l'énergie atomique
Berci, K.	EROTERV (Hongrie)
Braeckeveldt, M.	ONDRAF (Belgique)
Charette, M.-A.	MDS Nordion (Canada)
Dayal, R.	Consultant (Canada)
Degnan, P.	Agence internationale de l'énergie atomique
Dimitrovski, L.	ANSTO (Australie)
Falvi, L.	Institut des isotopes (Hongrie)
Fasten, W.	QSA GmbH (Allemagne)
Friedrich, V.	Agence internationale de l'énergie atomique
Grimm, J.	Ministère de l'énergie (États-Unis d'Amérique)
Heard, R.	Agence internationale de l'énergie atomique
Hordijk, L.	Necsa (Afrique du Sud)
Kinker, M.	Agence internationale de l'énergie atomique
Kohli, A.K.	BRIT (Inde)
Mayer, S.	Agence internationale de l'énergie atomique
Mele, I.	Agence internationale de l'énergie atomique
Mendoza Valdezco, E.	PNRI (Philippines)
Mikhalevich, P.	Isotope Technologies (Biélorus)
Mourão, R.	CNEN/CDTN (Brésil)
Neubauer, J.	Consultant (Autriche)
Niels, Y.	IRE (Belgique)
Novaković, M.	EKOTEH Ltd. (Croatie)
Ormai, P.	PURAM (Hongrie)
Pearson, M.W.	Laboratoire national de Los Alamos (États-Unis d'Amérique)
Smith, M.	Necsa (Afrique du Sud)
Syed Ahmad, S.H.S.	MINT (Malaisie)

Trifunović, D.

Office national de radioprotection (Croatie)

Tsyplenkov, V.

Consultant (Fédération de Russie)

Réunions de consultants

Vienne (Autriche) : 22-26 novembre 2004 ; 29 novembre - 3 décembre 2004 ; 17-21 octobre 2005 ;
31 mai - 4 juin 2010

Réunions techniques

Vienne (Autriche) : 28 novembre - 2 décembre 2005 ; 4-8 septembre 2006



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

N° 26

OÙ COMMANDER ?

Vous pouvez vous procurer les publications de l'AIEA disponibles à la vente chez nos dépositaires ci-dessous ou dans les grandes librairies.

Les publications non destinées à la vente doivent être commandées directement à l'AIEA. Les coordonnées figurent à la fin de la liste ci-dessous.

AMÉRIQUE DU NORD

Bernan / Rowman & Littlefield

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214 (États-Unis d'Amérique)

Téléphone : +1 800 462 6420 • Télécopie : +1 800 338 4550

Courriel : orders@rowman.com • Site web : www.rowman.com/bernan

RESTE DU MONDE

Veuillez-vous adresser à votre libraire préféré ou à notre principal distributeur :

Eurospan Group

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

London EC1R 5DB

(Royaume-Uni)

Commandes commerciales et renseignements :

Téléphone : +44 (0) 176 760 4972 • Télécopie : +44 (0) 176 760 1640

Courriel : eurospan@turpin-distribution.com

Commandes individuelles :

www.eurospanbookstore.com/iaea

Pour plus d'informations :

Téléphone : +44 (0) 207 240 0856 • Télécopie : +44 (0) 207 379 0609

Courriel : info@eurospangroup.com • Site web : www.eurospangroup.com

Les commandes de publications destinées ou non à la vente peuvent être adressées directement à :

Unité de la promotion et de la vente

Agence internationale de l'énergie atomique

Centre international de Vienne, B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Téléphone : +43 1 2600 22529 ou 22530 • Télécopie : +43 1 26007 22529

Courriel : sales.publications@iaea.org • Site web : www.iaea.org/publications

**AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE
VIENNE**