

## *Chapitre 11*

### **SÛRETÉ DU TRANSPORT DES SUBSTANCES RADIOACTIVES**

Après plus de 40 ans d'expérience du transport de substances radioactives, les pays membres de l'OCDE qui exploitent l'énergie nucléaire disposent d'un riche corpus de statistiques sur cette question.

La réglementation de la sûreté des transports est bien développée et harmonisée au niveau international. Les situations accidentelles y ont été prises en compte dès l'origine façonnant ainsi une réglementation orientée sur la prévention d'une exposition inacceptable en cas de rejet de radioactivité ou de défaillance de la protection biologique lors d'un accident. Dans la pratique, les colis doivent rester sûrs dans des conditions spécifiées : précipitations, compression, collision, incendie et immersion.

#### **1. Éléments de sûreté et réglementation**

À la différence de la sûreté des installations dont la réglementation technique relève de chaque pays, une base internationale a été élaborée par l'AIEA [1,2] pour la sûreté du transport. Cette sûreté repose sur trois grands principes :

- d'abord et avant tout, la robustesse de conception des colis ;
- la fiabilité des transports et des équipements spéciaux pour les véhicules ;
- l'efficacité de l'intervention en cas d'accident.

Les recommandations de l'AIEA spécifient les critères de performance des colis. Les fonctions de sûreté qu'ils doivent assurer sont le confinement, l'atténuation des rayonnements, la prévention des risques de criticité et des risques thermiques.

Le degré de sûreté du colis est fonction de la quantité et du danger potentiel de la matière transportée et définit ainsi le type de colis à utiliser. Pour chaque type de colis (les colis exceptés, les colis de type industriel, les colis de types A, B ou C), la réglementation définit les exigences de sûreté associées ainsi que les critères de réussite à des épreuves normalisées.

#### **1.1 Caractéristiques des divers types de colis**

Les colis exceptés ne sont soumis à aucune épreuve de qualification hors de l'usage courant. Ils doivent cependant respecter un certain nombre de spécifications générales, comme un débit de dose maximal à la surface inférieur à 0,005 mSv/h.

Les colis non fissiles industriels ou de type A ne sont pas supposés résister à des situations accidentelles. Cependant, ils doivent résister à certains incidents susceptibles de se produire lors du

transport ou des opérations de manutention et d'entreposage. Dans ce but, ils doivent satisfaire aux épreuves suivantes :

- exposition à un orage important (hauteur de précipitation de 5 cm/h pendant au moins 1 heure) ;
- chute sur une surface indéformable (pierre, béton ou acier) d'une hauteur variable selon la masse du colis (maximum 1,2 m) ou collision d'énergie équivalente ;
- compression équivalente à 5 fois la masse du colis ;
- chute sur le colis d'une barre en acier de 6 kg d'une hauteur de 1 m.

À l'issue de ces épreuves il ne doit pas y avoir de perte ou de dispersion de substances radioactives, et la dégradation de la protection radiologique doit être inférieure à 20 %.

Les colis fissiles ou de type B (figure 11.1) doivent être conçus pour continuer d'assurer leurs fonctions de confinement, de maintien de la sous criticité et de protection biologique dans des conditions accidentelles. Ces accidents sont simulés par les épreuves suivantes :

- trois épreuves consécutives :
  - chute de 9 m sur une surface indéformable ;
  - chute de 1 m sur un poinçon ;
  - incendie totalement enveloppant de 800°C au minimum pendant 30 minutes ;
- immersion pendant 8 heures sous 15 m d'eau (200 m pour les combustibles irradiés).

**Figure 11.1 – Colis de type B représentatif (Source COGEMA, France)**



Les colis de type C doivent être conçus pour continuer d'assurer leurs fonctions de confinement, de maintien de la sous criticité et de protection radiologique dans des conditions d'accident grave. Ces accidents sont représentés par les épreuves suivantes :

- trois épreuves consécutives :
  - chute de 9 m sur une surface indéformable ;
  - chute de 3 m sur un poinçon ;
  - incendie totalement enveloppant de 800°C au minimum pendant 60 min ;
- choc sur une surface indéformable à une vitesse de 90 m/s ;
- immersion pendant 1 heure sous 200 m d'eau.

## 1.2 Justification des exigences de sûreté

Les spécifications des épreuves prescrites pour les colis de type B correspondent aux situations accidentelles potentielles. Lorsqu'il est soumis à ces épreuves, le colis doit continuer d'assurer ses fonctions de confinement des substances radioactives et de protection biologique conformément aux normes établies dans le règlement de l'AIEA qui tient compte de la nature du contenu.

Les essais de sûreté réalisés sur les colis de type A partent du principe que le colis peut être détruit lors d'un accident grave mais qu'il doit résister à certains incidents de transport courants ainsi qu'à des accidents prévisibles tels qu'une chute lors de la manipulation, tandis que le colis de type B doit, d'après ce règlement, résister avec des marges de sûreté raisonnables à des épreuves sévères simulant des conditions accidentelles lors du transport. Pour ce type de colis, l'impact dû à une chute libre ainsi que l'incendie sont les événements les plus redoutés.

- L'épreuve de la chute de 9 m est généralement jugée aussi grave que la collision d'un colis installé sur le véhicule qui le transporte avec une pile de pont ou un mur en béton à une vitesse de 100 km/h étant donné qu'une bonne partie de l'énergie peut être absorbée par les structures déformables du véhicule. En 1977, les laboratoires Sandia à Albuquerque, au Nouveau-Mexique (États-Unis), ont réalisé des essais en vraie grandeur d'accidents incluant des collisions de conteneurs de combustible irradié avec des camions et des locomotives à des vitesses de plus de 100 km/h [3]. Le Royaume-Uni a mené en 1984 un essai pleine échelle de la collision d'un train roulant à 160 km/h sur un colis de combustible irradié, au cours duquel le colis a fait preuve de sa capacité de résister à un impact d'une telle importance [4].
- Les spécifications des essais d'incendie ou des épreuves thermiques reposent sur des statistiques d'incendies d'avions et de camions-citernes. Grâce aux isolants actuels, les colis sont aujourd'hui capables de résister à des incendies bien plus graves que ceux spécifiés dans la réglementation.

Plusieurs accidents ont confirmé la validité des épreuves de chute du conteneur, et notamment la chute de conteneurs d'uranium enrichi d'un wagon roulant à une vitesse de 100 km/h sur une voie ferrée en Allemagne (1972) et aux États-Unis (1977), la chute d'un conteneur de combustible irradié d'un pont autoroutier aux États-Unis (12 décembre 1970) et d'une grue en Belgique (1973). Des statistiques d'accidents sont données dans les tableaux 11.1 et 11.2.

Transporter des matières fissiles suppose que l'on a pris en compte tous les problèmes susceptibles de se produire en cas d'accident de criticité. La réglementation de l'AIEA impose un agrément des colis de matières fissiles qui tienne compte vis-à-vis de la criticité à la fois des résultats des diverses épreuves subies par les colis et des études d'accidents. À titre d'illustration, l'impact mécanique susceptible de rapprocher physiquement, par suite de la déformation des colis, plusieurs unités de matières fissiles indépendamment sûres compte au nombre des situations accidentelles envisagées pour agréer les colis de type B en fonction du risque de criticité.

Dans le cas de colis bien conçus et entretenus, on a du mal à imaginer quels pourraient être dans la pratique les scénarios d'accidents suffisamment graves pour endommager le confinement et contaminer l'environnement. Les niveaux de contamination seraient fonction de la nature et de l'inventaire radioactif du contenu du colis ainsi que des possibilités d'intervention des opérateurs [5,6]. Les accidents de transport terrestre énumérés aux tableaux 11.1 et 11.2 ont provoqué une contamination très limitée en activité et en durée qui n'a eu aucune conséquence sur les travailleurs ou le public.

On a également envisagé le cas où un navire transportant des substances radioactives prendrait feu accidentellement ou coulerait après une collision ou une autre défaillance. Des mesures de protection bien conçues permettent de limiter les risques d'incendie et d'explosion à bord. Pour le combustible irradié, le plutonium et les déchets de haute activité, une réglementation spécifique, le recueil INF de l'OMI [7] est mis en oeuvre afin d'éviter et de limiter les incendies à bord des navires. Au cas où le navire coulerait, la plupart des colis resteraient intacts à moins de sombrer dans des eaux extrêmement profondes. Les conséquences de la rupture du colis en eau profonde seraient alors tellement atténuées par l'effet de dilution que les personnes consommant des produits de la mer ne subiraient pas de conséquences radiologiques significatives. À des profondeurs moindres, l'attaque progressive de la corrosion devrait permettre également une dilution lente. La récupération des colis après le naufrage du Mont-Louis montre que les colis peuvent être récupérés pratiquement intacts dans des eaux relativement peu profondes (voir section 11-5).

S'agissant des colis de type C, le comportement exigé du colis en cas de collision et d'incendie a été déduit de l'étude d'accidents survenus dans le secteur du trafic aérien commercial [8]. Le colis doit conserver son étanchéité et sa protection biologique au cours de la plupart de ces accidents, y compris en cas d'impact à grande vitesse ou d'incendie très grave.

### ***1.3 Analyse critique des dossiers de sûreté***

Pour pouvoir être transportés, certaines substances et certains modèles de colis doivent être au préalable agréés par l'autorité compétente. Ce sont :

- les substances radioactives sous forme spéciale (sources radioactives, par exemple) ;
- les substances radioactives faiblement dispersables ;
- les colis de types B et C, et tous les colis de matières fissiles ;
- les colis qui peuvent, de par leur conception, contenir au moins 0,1 kg d'hexafluorure d'uranium ;
- les expéditions sous arrangement spécial (le colis ne répond pas à tous les critères requis, mais des mesures palliatives ont été prises pour que la sûreté du transport ne soit pas inférieure à celle d'un transport normal).

Le certificat d'agrément est délivré en fonction des informations spécifiées dans le règlement de l'AIEA ainsi que de toutes les données supplémentaires qui pourraient être demandées par l'autorité nationale compétente, et notamment :

- les calculs de contraintes démontrant une fiabilité suffisante du colis dans des conditions normales de manutention et d'usage ainsi que dans les conditions d'un accident de référence ;
- les calculs thermiques dans les conditions normales de fonctionnement et dans les conditions accidentelles ;
- les données d'assurance de la qualité.

Les certificats sont habituellement délivrés pour une période de quelques années. En général, ils sont donnés pour un modèle de colis et non colis par colis. Les conditions de fabrication, d'exploitation et de maintenance sont néanmoins systématiquement indiquées.

Ces agréments sont donc souvent délivrés indépendamment de l'opération de transport à proprement parler, pour laquelle d'ailleurs les autorités n'exigent pas d'avis préalable mais qui peut être soumise à des contrôles de sécurité.

## 2. Les différents acteurs industriels

Les principaux acteurs qui interviennent dans le transport sont l'expéditeur et le transporteur. L'expéditeur est responsable de la sûreté du colis, et il engage sa responsabilité par la déclaration d'expédition lorsqu'il remet le colis au transporteur. D'autres acteurs ont aussi un rôle : le concepteur, le fabricant, le propriétaire des colis et le commissionnaire de transport (mandaté par l'expéditeur pour l'organisation du transport).

Le transport de substances radioactives dans de bonnes conditions de sûreté exige de mettre en place une chaîne de responsabilités rigoureuse. Ainsi, dans le cas des transports importants :

- L'exploitant nucléaire, en tant qu'expéditeur, doit connaître parfaitement les caractéristiques des matières transportées de façon à choisir le type de colis à utiliser et à spécifier les conditions de transport.
- L'emballage correspondant doit être conçu et dimensionné en fonction des conditions d'utilisation et de la réglementation existante. Le plus souvent, il est nécessaire de réaliser un prototype pour le soumettre aux épreuves prévues par la réglementation. La phase suivante consiste à établir le dossier de sûreté qui sera présenté à l'autorité compétente à l'appui de la demande d'agrément.
- Lorsque l'on envisage d'utiliser des conteneurs existants, il convient de vérifier leur conformité aux modèles agréés. Pour ce faire, le propriétaire des emballages doit mettre au point un système de maintenance conforme à ce qui est décrit dans le dossier de sûreté et le certificat d'agrément.
- L'emballage est envoyé sur le site de l'expéditeur où il est chargé de la matière à transporter. L'expéditeur doit effectuer les contrôles relevant de sa responsabilité (étanchéité, débit de dose, température, contamination) sur l'emballage chargé avant sa mise sur la voie publique.
- Le transport lui-même est organisé par le commissionnaire de transport. Celui-ci est chargé d'obtenir toutes les autorisations nécessaires et d'envoyer les différents préavis pour le compte de l'expéditeur. Il doit aussi sélectionner le moyen de transport, la société de transport ainsi que l'itinéraire en fonction des exigences énumérées ci-dessus.
- La réalisation du transport est alors confiée à des sociétés spécialisées, qui disposent des autorisations et des véhicules nécessaires. En particulier les conducteurs des véhicules routiers doivent être en possession d'autorisations spéciales.

## 3. Spécificités du transport du combustible irradié

Les combustibles irradiés constituent, avec les déchets de haute activité vitrifiés, les plus grandes quantités de substances radioactives à transporter. Ces transports exigent de recourir aux châteaux de transport les plus sophistiqués. Afin d'éviter une contamination grave de la cavité interne des châteaux lors du transport, les éléments combustibles présentant une rupture de gaine sont placés dans des conteneurs spéciaux avant leur chargement.

Il existe plusieurs pratiques pour le transport du combustible irradié [9] :

- le chargement des châteaux dans la piscine de refroidissement du réacteur, le transport à sec et le déchargement en piscine, ce qui est la pratique employée en France, au Japon et en Suède ;
- le chargement en piscine, le transport sous eau et le déchargement en piscine, pratique adoptée par le Royaume-Uni ;
- le chargement en piscine, suivi d'un transport et d'un déchargement à sec, pratique qui se rencontre également en France.

Le transport sous eau présente l'avantage d'assurer un meilleur refroidissement. En revanche, une radiolyse incontrôlée durant le transport pourrait provoquer une forte surpression interne, voire des contraintes mécaniques importantes en cas de déflagration de H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> dans le volume libre. Il convient d'éviter le rejet de gaz contaminés durant le transport. De même, des systèmes d'étanchéité sont prévus pour empêcher une fuite d'eau susceptible de provoquer une contamination locale.

Pour le transport des combustibles à oxydes mixtes, on prévoit un temps de refroidissement plus long et une protection plus épaisse en raison de leurs températures et débits de dose plus élevés.

La technologie des emballages de grande dimension destinés aux combustibles actuels est parfaitement au point. Elle fait appel à un large éventail de disciplines, comme l'illustre la description très résumée qui suit.

### **3.1 *Transfert de chaleur***

Lors du transport à sec, le transfert de chaleur à l'intérieur du château s'effectue essentiellement par rayonnement (contre environ 10 % seulement par convection). La température du gainage dépend surtout de l'état et de l'émissivité de la surface, avec les conceptions actuelles cette température est généralement de 400°C. Lors du transport sous eau, la température du gainage est en général maintenue en dessous de 150°C par convection. La chaleur est transférée au milieu proche du conteneur par convection naturelle et rayonnement.

Parfois, les matériaux prévus dans la conception de l'emballage pour assurer la protection biologique servent également de protection contre l'incendie. C'est le cas notamment des protections à base de couches de plâtre humide, de couches de ciment alumineux et humide ou de résines polymères hydratées. Si le conteneur est pris dans un incendie, ces matériaux se déshydratent et forment une couche isolante efficace.

### **3.2 *Protection biologique***

Malgré son point de fusion peu élevé (327°C), on utilise encore souvent du plomb, notamment pour des emballages légers destinés au transport par route. On emploie également de la fonte et de l'acier, auquel cas l'emballage, plus lourd et plus gros, doit être transporté par rail. L'emballage est fermé par un barillet, une porte coulissante ou un couvercle boulonné ou vissé. Une protection biologique supplémentaire est assurée par l'eau (dans les conteneurs sous eau), des résines ou du polyéthylène.

### **3.3 *Conception mécanique***

L'enveloppe principale des emballages en acier ou en fonte assure la résistance nécessaire au choc et à la perforation. Des capots amortisseurs sont placés à chaque extrémité de l'emballage afin de limiter les effets des chocs. Les bouchons d'étanchéité amovibles sont protégés par des couvercles.

Le transport des éléments combustibles par camion ou par chemin de fer est actuellement la pratique industrielle la plus courante dans les zones continentales (États-Unis, Europe) [10]. Il existe une réglementation internationale et nationale très détaillée permettant de prévenir les risques radiologiques en cas d'incident ou d'accident [1].

Le Royaume-Uni, le Canada et la Suède se sont intéressés au transport maritime ou fluvial considéré comme un mode de transport plus sûr et moins coûteux que la route ou le rail. En effet, les navires détenus et utilisés par les organisations spécialistes du cycle du combustible ou les exploitants de centrales nucléaires offrent une plus grande sûreté dans la mesure où ils sont spécialement construits ou adaptés à ce type de transport. La présence à bord d'un personnel ayant reçu une formation spécifique constitue un atout supplémentaire en terme de sûreté [10,11,12]. L'Organisation maritime internationale a codifié les dispositifs de sûreté que doivent posséder les navires transportant les substances radioactives les plus dangereuses [7].

En 1998, des cas de contamination surfacique des emballages de transport du combustible irradié par rail, route et voie maritime ont été constatés en Europe. Des analyses préliminaires ont confirmé que l'on pouvait en réduire la fréquence et l'intensité par des mesures appropriées et que leurs conséquences dosimétriques respectaient les limites de dose recommandées pour les travailleurs et le public [13,14].

#### 4. Transport des déchets de haute activité vitrifiés

Pour le transport des déchets de haute activité vitrifiés, on rencontre des problématiques similaires à celles des éléments combustibles irradiés : rayonnement gamma, dégagement de chaleur intense et présence d'un rayonnement neutronique.

Le transport des déchets de haute activité vitrifiés soulève cependant moins de problèmes de sûreté que le transport des éléments combustibles irradiés car ces déchets contiennent très peu de matières fissiles, aucun radioélément à l'état gazeux (comme le <sup>85</sup>Kr) et, de surcroît, produisent moins de chaleur.

Par ailleurs, la logistique à mettre en place pour le transport par voie ferrée des déchets de haute activité vitrifiés est dans son principe la même que celle utilisée pour le combustible irradié.

#### 5. Sûreté des transports de substances radioactives

Les tableaux 11.1 et 11.2 [15,16] récapitulent les accidents de transport de substances radioactives déclarés aux États-Unis de 1971 à 1996 et en France en 1997 et 1998.

**Tableau 11.1 – Comportement des colis lors des accidents déclarés aux États-Unis entre 1971 et 1996**

Type de colis	Nombre de colis impliqués dans l'accident	Estimation du nombre de colis ayant libéré des substances radioactives
Excepté	–	–
Industriel	155	236
Type A	2 379	219
Type B	91	0
Moyenne annuelle	101	17

**Tableau 11.2 – Comportement des colis lors des accidents et incidents déclarés en France entre 1997 et 1998**

Type de colis	Nombre de colis impliqués dans l'accident	Estimation du nombre de colis ayant libéré des substances radioactives
Excepté	22	19
Industriel	9	0
Type A	24	3
Type B	18	3
Moyenne annuelle	36	12

À l'exception d'un éventuel rejet de radioactivité dans l'océan Atlantique des emballages coulés lors du naufrage du MSC Carla décrit ci-dessous, le relâchement maximum de radioactivité dans l'environnement lors des accidents de transport français de 1997 et 1998 a été estimé à 100 MBq par événement. Il s'agit donc d'un relâchement 5 000 fois inférieur au relâchement maximum envisagé par les autorités de sûreté. Aucun de ces événements n'a provoqué de contamination ni d'irradiation significative des travailleurs ou du public.

Ci-dessous sont décrits quelques incidents de transport survenus en France et aux États-Unis, qui sont représentatifs des accidents les plus graves enregistrés dans ces pays. Seuls trois d'entre eux sont effectivement liés au cycle du combustible (Springfields, Mont-Louis et Europe), les autres ont été retenus pour les enseignements généraux que l'on peut en tirer.

### **5.1 Accident sur l'autoroute à Springfields, Massachusetts, États-Unis (1991)**

Un conducteur en état d'ivresse conduisait à contresens sans feux de signalisation. L'automobile a heurté un camion transportant 12 colis de combustible neuf. Chaque colis contenait deux assemblages. Les pompiers qui sont intervenus ont signalé que le camion avait heurté le rail de protection de droite, puis celui du centre, provoquant la rupture d'un réservoir d'essence qui s'est enflammé. Le camion a été pris dans les flammes. On n'a pas enregistré de rejet de radioactivité ni de contamination de l'environnement, et l'accident n'a causé aucune blessure ou décès imputable à un relâchement de radioactivité.

### **5.2 Collision ferroviaire, Kenefick Siding, Kansas, États-Unis (1997)**

Deux trains sont entrés en collision. Le 25<sup>ème</sup> wagon de l'un des trains contenait des substances radioactives. Ce wagon et son contenu se sont consumés dans l'incendie provoqué par l'accident. Cet accident n'a provoqué ni rejet de radioactivité, ni contamination de l'environnement, et n'a causé aucune blessure ou décès imputable à un relâchement de radioactivité.

### **5.3 Incendie d'avion, Newburg, New York, États-Unis (1996)**

Dans un avion parti de Memphis, Tennessee, et volant vers Boston, Massachusetts, les détecteurs de fumée se sont déclenchés dans quatre secteurs. L'équipage a détourné l'avion vers Newburg, dans l'État de New York, et a pu sortir de l'appareil avec un observateur au moment de l'atterrissage. L'appareil a ensuite été pris dans les flammes, dont l'origine est indéterminée. Se trouvaient à bord 8 colis de type A et 2 colis de type B dont aucun n'a laissé échapper son contenu. Cet accident n'a provoqué ni rejet de radioactivité, ni contamination de l'environnement et n'a causé aucune blessure ou décès imputable à un relâchement de radioactivité.



#### **5.4 Collision entre un train et un chariot à bagages, gare de Montpellier, France (1983)**

Un générateur de technétium d'une activité inférieure à 15 GBq s'est brisé lorsque le chariot à bagages sur lequel il se trouvait a traversé la voie et a été heurté par un train. La locomotive et le ballast ont été contaminés. On a détecté des signes de contamination sur 19 personnes parmi celles qui ont été examinées, mais cette contamination n'a pas été jugée significative. La contamination n'a pas été jugée préoccupante étant donné les quantités limitées impliquées dans l'accident ainsi que la période, courte, des éléments concernés.

#### **5.5 Naufrage du Mont-Louis, mer du Nord (1984)**

Dans la mer du Nord, à 15 km au large d'Ostende, un ferry est venu éperonner le cargo français Mont-Louis. Gravement endommagé, le Mont-Louis a coulé en quelques heures sur un banc de sable à une profondeur de 15 m à marée basse, avec sa cargaison de 30 colis industriels de type 48Y remplis d'hexafluorure d'uranium enrichi à moins de 1 %, soit une masse totale de 350 tonnes d'UF<sub>6</sub>. Les 30 conteneurs ont pu être récupérés malgré le mauvais temps et les difficultés d'accès à la cale où ils étaient stockés. Un ou deux conteneurs avaient fui, et une cinquantaine de litres d'eau avait pénétré à l'intérieur par suite d'une détérioration de leur vanne. Pendant la récupération des conteneurs, 700 analyses ont été réalisées (à la surface et en eau profonde) sans que l'on puisse détecter de radioactivité. Cet événement a contribué à la mise en oeuvre de nouvelles dispositions réglementaires destinées à prendre en compte la toxicité chimique de l'hexafluorure d'uranium.

#### **5.6 Naufrage du MSC Carla, océan Atlantique (1997)**

Sous l'effet d'un vent violent de force 10 à 12, et d'une vague scélérate, un porte-conteneurs s'est brisé au nord des Açores. La cargaison installée à l'avant du navire comportait trois irradiateurs biologiques d'origine française contenant du <sup>137</sup>Cs scellé conditionné sous une forme spéciale agréée, d'une activité totale de 330 TBq. L'avant du navire a coulé à une profondeur de 3 000 mètres, cinq jours après. Étant donné que l'impact sur les individus de la population par la voie de transfert de la consommation de produits de la mer a été évaluée à 1 pSv (10<sup>-9</sup> mSv), et que ces sources se trouvaient à des profondeurs non exploitées par la pêche, il n'a pas été prévu de les récupérer.

#### **5.7 Contamination des colis et des véhicules, en Europe (1998)**

Tous les ans, environ 200 colis contenant du combustible irradié quittent les centrales nucléaires européennes à destination de l'usine de retraitement de COGEMA à La Hague, en France. La plupart de ces colis sont expédiés par voie ferrée au terminal de Valognes, où ils sont déchargés pour poursuivre par route leur trajet jusqu'à l'usine de retraitement qui se trouve à 30 km de là. La contamination surfacique des colis et des wagons est contrôlée par COGEMA à leur arrivée au terminal de Valognes. En 1997, sur un tiers des convois, la contamination surfacique dépassait, en un point au moins, la limite réglementaire fixée à 4 Bq/cm<sup>2</sup>. Ces faits ont été confirmés lors d'une inspection organisée conjointement par les autorités de sûreté et de radioprotection. Il a été établi que ces incidents n'avaient aucun effet sur la santé, mais ces derniers ont mis en évidence le peu de rigueur avec lequel étaient menées les opérations de prévention de la contamination et de nettoyage de ces colis sur les sites de réacteurs.

## 5.8 Incendie d'un camion sur l'autoroute à Langres, France (1999)

Un camion transportant 900 détecteurs de fumée placés dans 3 colis exceptés a pris feu sur une autoroute. Chaque détecteur de fumée contenait une source scellée d' $^{241}\text{Am}$  de sorte que l'activité totale de la cargaison atteignait 4 MBq. Le camion transportait également des fluides combustibles (peinture, huile et alcool). Le feu a pris dans les freins et a été extrêmement violent (il a duré entre 2 et 3 heures) ; la remorque a été détruite. Les pompiers et la brigade de gendarmerie de Langres sont intervenus sans être informés que le chargement était radioactif. La violence de l'incendie les a obligés à porter des protections respiratoires. La remorque a été transportée chez un récupérateur de ferraille et les autres déchets dans une décharge conventionnelle. Les analyses d'urine ont montré que les pompiers n'avaient pas reçu de doses significatives. Sur le site de l'incendie, on a enregistré, sur une surface d'un mètre carré, une contamination alpha 10 fois supérieure au niveau du bruit de fond naturel. Les échantillons de sol présentaient une activité de 4 kBq/kg. L'eau déversée par les pompiers explique que l'on ait détecté des niveaux d'activité en aval, bien que moindres. Le châssis détruit de la remorque (stocké chez un ferrailleur) présentait des points contaminés, et des débris incendiés présentaient une activité de 12 kBq/kg.

## 6. Références

- [1] IAEA (1985), *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials* (1985 Edition), Safety Series N° 6, IAEA, Vienne.
- [2] IAEA (1996), *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, (ST-1, revised), TS-R-1, IAEA, Vienne.
- [3] McClure, J.D. (1980), *Relative Response of Type B Packagings to Regulatory and Other Impact Test Environments*, PATRAM 80, p. 555.
- [4] Toxic Materials Transport 5 (1984), "Spent Nuclear Fuel Flask Survives British Crash Test", (16), July.
- [5] ANS (1977), Preliminary Risk Analysis of the Transportation of Nuclear Wastes, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 25 (1), Supplement.
- [6] Van Otterloo, R.W. (1977), Risk Analysis of the Road Transport of Radioactive Wastes in the Netherlands, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 25 (1), Supplement.
- [7] IMO (1993), *Code for the Safe Carriage of Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High Level Radioactive Wastes in Flasks on Board Ships*, International Maritime Organization INF Code.
- [8] Raffestin, D. (1998), *Risk Assessment of Accident Associated with Aircraft Transportation*, PATRAM 98, pp. 1467-1471.
- [9] Baillif, L. *et al.* (1987), *Spent Fuel Unloading and Storage at La Hague*, RECOD-87, Vol. 1, pp. 341-435.
- [10] IAEA (1984), *Guidebook on Spent Fuel Storage*, Technical Reports Series No. 240, International Atomic Energy Agency, Vienne, pp. 54-70.

- [11] Carter, T.J. *et al.* (1987), *Development of Systems for Transporting Irradiated CANDU Fuel in Ontario*, RECOD-87, Vol. 1, pp. 361-368.
- [12] Gustafson, B. (1982), "Design and Working Environment of the Central Temporary Storage Facility and Sea Transport System, Presently under Realization in Sweden", *Transactions of the American Nuclear Society*, Trans ENC-3, Bruxelles, Vol. 40, pp. 146-149.
- [13] Common Report of the Competent Authorities of France, Germany, Switzerland and the United Kingdom (1999), "Surface Contamination of Nuclear Spent Fuel Shipments", *International Journal of Radioactive Materials Transport*, Vol. 10, N° 2, pp. 73-84.
- [14] IAEA (1999), "Spent Fuel Storage and Transport Cask Decontamination and Modification", IAEA-TECDOC-1081, April.
- [15] McClure, J.D. *et al.* (1998), *Radioactive Material Transportation Accident and Incident Experiences in the USA (1971-1997)*, PATRAM 98, pp. 363-370.
- [16] Rancillac, F. *et al.* (1998), "Declarations of Transport Accidents and Incidents in France and Contribution to the IAEA Database EVTRAM", *International Journal of Radioactive Materials Transport*, Vol. 10, N° 1, pp. 21-26.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Avant-propos</b> .....	3
<b>Liste des figures</b> .....	11
<b>Liste des tableaux</b> .....	13
<b>Chapitre 1. INTRODUCTION ET RÉSUMÉ</b> .....	15
1. Introduction.....	15
2. Résumé.....	16
<b>Chapitre 2. LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE</b> .....	21
1. Activités du cycle du combustible nucléaire.....	21
2. Situation des différentes étapes du cycle du combustible .....	24
2.1 <i>Extraction et concentration de l'uranium</i> .....	24
2.2 <i>Purification de l'uranium et conversion en hexafluorure</i> .....	29
2.3 <i>Enrichissement</i> .....	32
2.4 <i>Fabrication du combustible</i> .....	35
2.5 <i>Entreposage du combustible irradié</i> .....	42
2.6 <i>Retraitement du combustible irradié</i> .....	44
2.7 <i>Gestion des déchets radioactifs</i> .....	52
2.8 <i>Entreposage des déchets sur site</i> .....	56
2.9 <i>Le transport des substances radioactives</i> .....	60
2.10 <i>Démantèlement</i> .....	61
3. Références.....	68
<b>Chapitre 3. PRINCIPES DE SÛRETÉ</b> .....	77
1. Cadre réglementaire .....	78
1.1 <i>Responsabilités gouvernementales</i> .....	78
1.2 <i>Responsabilités de l'organisme réglementaire</i> .....	79
1.3 <i>Réglementations et guides</i> .....	80
1.4 <i>Autorisations</i> .....	80
1.5 <i>Examen et évaluation</i> .....	81
1.6 <i>Inspection réglementaire et respect de la réglementation</i> .....	82
1.7 <i>Assurance de la qualité</i> .....	82
1.8 <i>Intervention en cas d'urgence</i> .....	83
2. Considérations de sûreté .....	83
2.1 <i>Sûreté radiologique</i> .....	84
2.2 <i>Criticité</i> .....	85
2.3 <i>Risques chimiques</i> .....	85
2.4 <i>Incendie et explosion</i> .....	86
2.5 <i>Défaillance des équipements</i> .....	86
2.6 <i>Erreurs humaines</i> .....	87
2.7 <i>Événements d'origine externe</i> .....	87
2.8 <i>Perte des alimentations électriques</i> .....	88
2.9 <i>Perte des utilités</i> .....	88

3.	Évaluation de la sûreté .....	88
3.1	<i>Détermination des situations anormales</i> .....	89
3.2	<i>Analyse par arbre de défaillances</i> .....	89
3.3	<i>Évaluation des conséquences</i> .....	90
4.	Échelle de gravité des évènements nucléaires .....	90
5.	Références.....	94
<b>Chapitre 4.</b>	<b>GÉNÉRALITÉS SUR LA SÛRETÉ</b> .....	97
1.	Sûreté radiologique .....	97
1.1	<i>Programme de protection contre les rayonnements</i> .....	98
1.2	<i>Confinement et ventilation</i> .....	98
1.3	<i>Confinement</i> .....	99
1.4	<i>Ventilation</i> .....	101
2.	Criticité .....	101
2.1	<i>Sûreté-criticité</i> .....	102
2.2	<i>Facteurs affectant la criticité</i> .....	103
2.3	<i>Anomalies possibles</i> .....	104
2.4	<i>Philosophie de l'évaluation</i> .....	105
2.5	<i>Accident de criticité</i> .....	105
3.	Risques chimiques.....	106
4.	Risques d'incendie et d'explosion .....	107
4.1	<i>Risque d'incendie – généralités</i> .....	107
4.2	<i>Analyse des risques d'incendie</i> .....	108
4.3	<i>Mesures de prévention</i> .....	108
4.4	<i>Systèmes de détection d'incendie</i> .....	109
4.5	<i>Moyens de lutte contre l'incendie</i> .....	109
4.6	<i>Contrôles périodiques – consignes de sûreté</i> .....	109
4.7	<i>Risques d'explosion</i> .....	110
5.	Maintenance .....	110
6.	Facteurs humains.....	111
6.1	<i>Introduction</i> .....	111
6.2	<i>Définitions</i> .....	112
6.3	<i>Fiabilité humaine</i> .....	112
6.4	<i>Ergonomie</i> .....	114
6.5	<i>Psychologie organisationnelle</i> .....	114
7.	Effluents .....	115
8.	Considérations environnementales .....	115
9.	Questions de sûreté externe.....	116
9.1	<i>Séismes</i> .....	116
9.2	<i>Incendies ou explosions extérieurs au site</i> .....	117
9.3	<i>Chutes accidentelles d'avion</i> .....	117
9.4	<i>Conditions atmosphériques extrêmes</i> .....	118
10.	Références .....	120
<b>Chapitre 5.</b>	<b>SÛRETÉ DE L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE</b> .....	121
1.	Extraction et traitement du minerai d'uranium .....	121
2.	Purification et conversion de l'uranium.....	125
2.1	<i>Protection radiologique</i> .....	126
2.2	<i>Sécurité classique</i> .....	127
2.3	<i>Plans d'urgence</i> .....	129
2.4	<i>Gestion et évaluation de la sûreté</i> .....	129
2.5	<i>Gestion des déchets et surveillance de l'environnement</i> .....	130

3. Enrichissement de l'uranium .....	131
3.1 <i>La mesure du travail d'enrichissement</i> .....	131
3.2 <i>Techniques d'enrichissement</i> .....	133
3.3 <i>Risques liés à l'hexafluorure de l'uranium</i> .....	140
3.4 <i>Risques nucléaires/radiologiques</i> .....	141
4. Fabrication du combustible.....	142
4.1 <i>Conversion en UO<sub>2</sub> de l'hexafluorure d'uranium enrichi</i> .....	143
4.2 <i>Mesures de sûreté spécifiques aux usines de fabrication du combustible MOX</i> ...	145
5. Références.....	149
<b>Chapitre 6. SÛRETÉ DE L'ENTREPOSAGE DES COMBUSTIBLES IRRADIÉS</b> .....	151
1. Installations d'entreposage sous eau .....	152
1.1 <i>Entreposage en piscine sur le site du réacteur</i> .....	152
1.2 <i>Entreposage en piscine hors du site du réacteur (HSR)</i> .....	152
1.3 <i>Capacité d'entreposage en piscine sur les sites de retraitement</i> .....	153
1.4 <i>Questions de sûreté associées à l'entreposage sous eau du combustible irradié</i> ..	153
2. Installations d'entreposage à sec.....	160
2.1 <i>Situation</i> .....	160
2.2 <i>Entreposage à sec en puits</i> .....	160
2.3 <i>Châteaux métalliques</i> .....	160
2.4 <i>Silos (châteaux en béton)</i> .....	162
2.5 <i>Fosses d'entreposage</i> .....	162
2.6 <i>Synthèse de l'exploitation de l'entreposage à sec</i> .....	163
2.7 <i>Aspects de la sûreté relatifs aux installations d'entreposage à sec</i> .....	163
3. Thèmes d'actions futures .....	164
4. Références.....	166
<b>Chapitre 7. SÛRETÉ DU RETRAITEMENT DES COMBUSTIBLES</b> .....	169
1. Considérations générales.....	169
1.1 <i>Risques d'origine nucléaire</i> .....	171
1.2 <i>Risques non-nucléaires d'origine interne</i> .....	178
1.3 <i>Risques non-nucléaires d'origine externe</i> .....	180
2. Retraitement des combustibles Magnox et alliages .....	183
2.1 <i>Criticité</i> .....	183
2.2 <i>Incendie</i> .....	184
2.3 <i>Corrosion</i> .....	184
2.4 <i>Généralités</i> .....	184
3. Retraitement des combustibles oxyde d'uranium .....	184
3.1 <i>Situation actuelle</i> .....	184
3.2 <i>Analyse de sûreté</i> .....	186
3.3 <i>Expérience d'exploitation</i> .....	195
4. Combustible à mélange d'oxydes (MOX) .....	198
4.1 <i>Situation actuelle</i> .....	198
4.2 <i>Analyse de sûreté</i> .....	199
5. Combustible des réacteurs à neutrons rapides .....	200
5.1 <i>Situation actuelle</i> .....	200
5.2 <i>Analyse de sûreté</i> .....	200
5.3 <i>Expérience d'exploitation</i> .....	200
5.4 <i>Entreposage du plutonium et conversion en oxyde</i> .....	201
5.5 <i>Entreposage de l'uranium et conversion en oxyde</i> .....	204
6. Références.....	205

<b>Chapitre 8. SÛRETÉ DE LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS .....</b>	<b>209</b>
1. Contexte général .....	209
2. Déchets liquides de haute activité.....	211
2.1 <i>Entreposage sous forme liquide</i> .....	212
2.2 <i>Considérations de sûreté</i> .....	216
2.3 <i>Perte de refroidissement</i> .....	216
2.4 <i>Perte de confinement</i> .....	217
3. Déchets solides de haute activité.....	219
3.1 <i>Solidification des déchets</i> .....	219
3.2 <i>Technologie et expérience de la vitrification</i> .....	220
3.3 <i>Considérations de sûreté</i> .....	223
3.4 <i>Mesures préventives et correctives</i> .....	225
4. Déchets de gainage du combustible – résidus de cisailage et de clarification .....	225
5. Déchets de moyenne activité et contenant du plutonium.....	227
5.1 <i>Méthodes de traitement et de conditionnement</i> .....	228
6. Gestion des effluents gazeux.....	232
7. Références.....	233
<b>Chapitre 9. SÛRETÉ DE L'ENTREPOSAGE DES DÉCHETS SUR SITE.....</b>	<b>239</b>
1. Déchets vitrifiés .....	239
1.1 <i>Technologie et expérience acquise</i> .....	239
1.2 <i>Considérations de sûreté</i> .....	240
2. Déchets de gainage.....	242
2.1 <i>Introduction</i> .....	242
2.2 <i>Débris de gaines de Magnox</i> .....	242
2.3 <i>Déchets en acier inoxydable</i> .....	243
2.4 <i>Coques de Zircaloy et embouts</i> .....	243
2.5 <i>Déchets de graphite</i> .....	244
3. Résidus insolubles.....	244
4. Références.....	245
<b>Chapitre 10. SÛRETÉ DU DÉMANTÈLEMENT DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES</b>	<b>247</b>
1. Stratégie de démantèlement .....	247
1.1 <i>Politiques gouvernementales</i> .....	248
1.2 <i>Échéancier des opérations de démantèlement</i> .....	249
2. Planification du démantèlement.....	250
3. Gestion du démantèlement.....	251
4. Conditions générales d'un démantèlement sûr .....	252
4.1 <i>Évaluation de la sûreté et dossiers de sûreté</i> .....	253
4.2 <i>Radioprotection et démarche ALARA</i> .....	254
5. Techniques de démantèlement .....	254
5.1 <i>Caractérisation</i> .....	256
5.2 <i>Décontamination</i> .....	256
5.3 <i>Démontage et démolition</i> .....	257
5.4 <i>Fermeture sous surveillance</i> .....	258
5.5 <i>Bilan radiologique final/réaménagement du site</i> .....	258
6. Résumé de l'expérience de démantèlement .....	259
7. Références.....	259

<b>Chapitre 11. SÛRETÉ DU TRANSPORT DES SUBSTANCES RADIOACTIVES .....</b>	<b>265</b>
1. Éléments de sûreté et réglementation.....	265
1.1. <i>Caractéristiques des divers types de colis</i> .....	265
1.2. <i>Justification des exigences de sûreté</i> .....	267
1.3. <i>Analyse critique des dossiers de sûreté</i> .....	268
2. Les différents acteurs industriels.....	269
3. Spécificités du transport du combustible irradié.....	269
3.1 <i>Transfert de chaleur</i> .....	270
3.2 <i>Protection biologique</i> .....	270
3.3 <i>Conception mécanique</i> .....	270
4. Transport des déchets de haute activité vitrifiés .....	271
5. Sûreté des transports de substances radioactives .....	271
5.1 <i>Accident sur l'autoroute à Springfield, Massachusetts, États-Unis (1991)</i> .....	272
5.2 <i>Collision ferroviaire, Kenefick Siding, Kansas, États-Unis (1997)</i> .....	272
5.3 <i>Incendie d'avion, Newburg, New York, États-Unis (1996)</i> .....	272
5.4 <i>Collision entre un train et un chariot à bagages, gare de Montpellier, France (1983)</i> .....	273
5.5 <i>Naufrage du Mont-Louis, mer du Nord (1984)</i> .....	273
5.6 <i>Naufrage du MSC Carla, océan Atlantique (1997)</i> .....	273
5.7 <i>Contamination des colis et des véhicules, en Europe (1998)</i> .....	273
5.8 <i>Incendie d'un camion sur l'autoroute à Langres, France (1999)</i> .....	274
6. Références.....	274
<b>Chapitre 12. DONNÉES DE SÛRETÉ DES INSTALLATIONS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE.....</b>	<b>277</b>
1. Doses au personnel.....	277
1.1 <i>Extraction et traitement de l'uranium</i> .....	277
1.2 <i>Enrichissement</i> .....	277
1.3 <i>Fabrication de combustible au dioxyde d'uranium</i> .....	279
1.4 <i>Fabrication de combustible à l'oxyde mixte (MOX)</i> .....	282
1.5 <i>Retraitement</i> .....	283
2. Rejets .....	286
2.1 <i>Extraction et traitement de l'uranium</i> .....	287
2.2 <i>Enrichissement</i> .....	287
2.3 <i>Fabrication de combustible au dioxyde d'uranium</i> .....	287
2.4 <i>Fabrication de combustible à l'oxyde mixte (MOX)</i> .....	288
2.5 <i>Retraitement</i> .....	289
3. Principaux incidents.....	292
3.1 <i>Incidents de criticité</i> .....	292
3.2 <i>Rejet d'UF6</i> .....	299
3.3 <i>Incendie et réactions exothermiques</i> .....	302
3.4 <i>Fuites de substances radioactives, contamination</i> .....	312
3.5 <i>Perte d'alimentation électrique</i> .....	317
3.6 <i>Incidents d'origine externe</i> .....	318
4. Références.....	319



<b>CONCLUSIONS PRINCIPALES</b> .....	321
1. Évolution du contexte général au cours de la dernière décennie .....	321
2. Tour d’horizon de la sûreté nucléaire au cours de la dernière décennie .....	321
3. Évolutions par domaine d’activité .....	323
4. Conclusion générale.....	325
<i>Annexe 1.</i> Liste des installations du cycle du combustible dans les pays de l’OCDE – État 2002-2003.....	327
<i>Annexe 2.</i> Glossaire .....	333
<i>Annexe 3.</i> Liste des abréviations.....	341

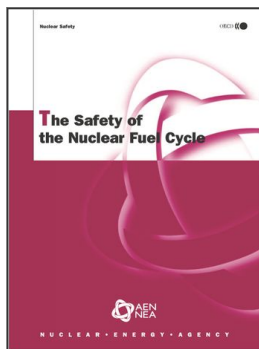
## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Le cycle du combustible nucléaire .....	22
Figure 2.2	Assemblage combustible typique de réacteur REP .....	24
Figure 2.3	Réserves mondiales d'uranium.....	25
Figure 2.4	Répartition de la production d'uranium par compagnie (monde 1998).....	25
Figure 2.5	Production d'uranium des pays occidentaux par rapport aux besoins en réacteurs...	26
Figure 2.6	Extraction de l'uranium à partir du minerai .....	28
Figure 2.7	Purification et conversion de l'uranium en hexafluorure .....	29
Figure 2.8	Procédés de conversion de l'UF <sub>6</sub> en UO <sub>2</sub> .....	35
Figure 2.9	Procédé MIMAS de fabrication de combustible MOX .....	38
Figure 2.10	Diagramme du procédé de co-conversion PNC (maintenant JNC).....	40
Figure 2.11	Procédé de fabrication de combustible MOX à l'usine PFPF (Japon) .....	41
Figure 2.12	Opérations de retraitement.....	44
Figure 2.13	Diagramme général du procédé PUREX.....	48
Figure 2.14	Conversion de l'uranium et du plutonium en UO <sub>2</sub> , PuO <sub>2</sub> et UO <sub>2</sub> – PuO <sub>2</sub> pour la fabrication du MOX.....	50
Figure 2.15	Cuve de solution de produits de fission dans l'atelier R7 .....	51
Figure 2.16	Procédé AVM de vitrification continue.....	54
Figure 2.17	Coulée du verre dans l'atelier R7 à La Hague.....	55
Figure 2.18	Entreposage des déchets solides (EDS) de faible activité à La Hague.....	59
Figure 3.1	Les degrés d'INES.....	91
Figure 3.2	Explications détaillées des degrés d'INES .....	92
Figure 5.1	Extraction du minerai – Méthode de forage en grand diamètre .....	123
Figure 5.2	Installation de gestion des résidus de traitement à la mine de Key Lake .....	124
Figure 5.3	Procédé de lixiviation <i>in situ</i> à la mine de Crow Butte .....	125
Figure 5.4	Consommation d'U naturel et travail de séparation par kg d'U enrichi.....	132
Figure 5.5	Cellule de l'usine de Portsmouth après l'incendie .....	135
Figure 5.6	Schéma d'une centrifugeuse.....	136
Figure 5.7	Cascade de centrifugeuses .....	137
Figure 5.8	Principe du procédé SILVA .....	139
Figure 5.9	Le système SILVA .....	139
Figure 6.1	Piscine d'entreposage .....	151
Figure 6.2	Entreposage à sec de combustibles irradiés en châteaux métalliques à Emsland (Allemagne) .....	161
Figure 7.1	Vue aérienne de l'usine UP3-A du site de La Hague .....	169
Figure 7.2	EMEM (Équipement Mobile d'Évacuation de Matériel) dans l'atelier AD2 à La Hague.....	173
Figure 7.3	Vue de la roue du dissolvant utilisé sur UP2-800 et UP3 .....	176
Figure 7.4	Vue générale d'un évaporateur.....	193
Figure 7.5	Vue d'un évaporateur de plutonium à Dounreay .....	194
Figure 7.6	Colonne pulsée dans l'atelier T2 à La Hague .....	196
Figure 7.7	Réservoir « harpe » sous-critique pour le nitrate de plutonium .....	201
Figure 8.1	Presse de compactage dans l'atelier ACC à La Hague .....	210

Figure 8.2	Volume des résidus conditionnés dans UP3-A pour évacuation .....	211
Figure 8.3	Coupe schématique d'une cuve de solutions de haute activité .....	213
Figure 8.4	Vue d'une cuve de solutions de haute activité avec les serpentins de refroidissement .....	213
Figure 8.5	Cuve de solutions de haute activité à double enveloppe de fond .....	214
Figure 8.6	Conteneur de déchets de haute activité vitrifiés .....	221
Figure 8.7	Atelier de vitrification R7 de La Hague : vue intérieure de l'une des trois cellules de calcination et de vitrification .....	221
Figure 8.8	Conteneurs de déchets vitrifiés sur le carrousel du poste de coulée de la chaîne de vitrification 3 de Sellafield pendant les essais inactifs .....	222
Figure 8.9	Poste de coulée des fûts de bitume à STE3 (La Hague) .....	229
Figure 8.10	Chambre de combustion de l'atelier MDS .....	231
Figure 9.1	Hall d'entreposage des déchets vitrifiés .....	239
Figure 11.1	Colis de type B représentatif .....	266
Figure 12.1	Dose moyenne (externe + interne) du personnel – usine de combustible à l'uranium de Juzbado, Espagne .....	281
Figure 12.2	Dose collective par GWe/an produit par le combustible retraité La Hague, France .	284
Figure 12.3	Dose collective, site de Sellafield, Royaume-Uni .....	285
Figure 12.4	Dose individuelle moyenne, site de Sellafield, Royaume-Uni .....	286
Figure 12.5	Rejets alpha totaux dans l'Atlantique nord-est.....	286
Figure 12.6	Rejets bêta totaux dans l'Atlantique nord-est.....	287
Figure 12.7	Rejets gazeux – Doses au groupe de référence du public – Usine de fabrication de combustible de Juzbado, Espagne .....	287
Figure 12.8	Rejets liquides – Doses au groupe de référence du public – Usine de fabrication de combustible de Juzbado, Espagne .....	288
Figure 12.9	Rejets liquides et production, La Hague, France.....	289
Figure 12.10	Rejets liquides alpha, Sellafield, Royaume-Uni .....	291
Figure 12.11	Rejets liquides bêta, Sellafield, Royaume-Uni .....	291

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Répartition mondiale de la production d'uranium par compagnie .....	26
Tableau 2.2	Installations d'entreposage .....	58
Tableau 2.3	Quantités de matériaux produits jusqu'en 2003 par le démantèlement de l'usine Eurochemic (en kg/an) .....	67
Tableau 2.4	Doses du personnel pour le démantèlement de l'usine Eurochemic.....	68
Tableau 5.1	Procédés d'enrichissement de l'uranium .....	133
Tableau 6.1	Comparaison des conditions pour le combustible des REO .....	153
Tableau 7.1	Bilan du retraitement des combustibles oxyde .....	185
Tableau 7.2	Prévision de l'évolution à moyen terme du combustible en France .....	199
Tableau 8.1	Facteurs de décontamination en exploitation – Pilotes de vitrification .....	223
Tableau 10.1	Différences entre le démantèlement et l'exploitation .....	251
Tableau 11.1	Comportement des colis lors des accidents déclarés aux États-Unis entre 1971 et 1996 .....	271
Tableau 11.2	Comportement des colis lors des accidents et incidents déclarés en France entre 1997 et 1998.....	272
Tableau 12.1	Japon, exposition annuelle moyenne pour l'enrichissement et la fabrication de combustible .....	277
Tableau 12.2	Dose annuelle moyenne pour les opérateurs États-Unis de la fabrication, du traitement et de l'enrichissement .....	278
Tableau 12.3	Doses du personnel – usine de combustible à l'uranium de Dessel, Belgique .....	279
Tableau 12.4	Doses externes des travailleurs – usine de combustible à l'uranium de Romans, France.....	279
Tableau 12.5	Doses internes des travailleurs – usine de combustible à l'uranium de Romans, France.....	280
Tableau 12.6	Doses du personnel – usine de combustible à l'uranium de Lingen, Allemagne .	280
Tableau 12.7	Doses du personnel – usine de combustible à l'uranium de Juzbado, Espagne....	281
Tableau 12.8	Doses du personnel – usine de combustible à l'uranium de Springfields, Royaume-Uni .....	282
Tableau 12.9	Doses du personnel – usine de combustible MOX de Dessel, Belgique .....	282
Tableau 12.10	Doses du personnel (sous-traitants compris) – usine de combustible MOX MELOX, France .....	283
Tableau 12.11	Doses du personnel MELOX seul – usine de combustible MOX MELOX, France .....	283
Tableau 12.12	Exposition annuelle moyenne pour le personnel des usines de retraitement japonaises .....	284
Tableau 12.13	Rejets – Doses au groupe de référence du public – Usine de fabrication de combustible de Springfields, Royaume-Uni .....	288
Tableau 12.14	Rejets atmosphériques, La Hague, France (en Bq).....	289
Tableau 12.15	Rejets, JNC, Tokai mura, Japon.....	290



Extrait de :  
**The Safety of the Nuclear Fuel Cycle - Third Edition**

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/9789264014220-en>

**Merci de citer ce chapitre comme suit :**

OCDE/Agence pour l'énergie nucléaire (2006), « Sûreté du transport des substances radioactives », dans *The Safety of the Nuclear Fuel Cycle - Third Edition*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264014244-12-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à [rights@oecd.org](mailto:rights@oecd.org). Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) [info@copyright.com](mailto:info@copyright.com) ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) [contact@cfcopies.com](mailto:contact@cfcopies.com).