

Rapport Final

LES TRANSPORTS DE L'INDUSTRIE DU PLUTONIUM EN FRANCE Une activité à haut risque

Xavier COEYTAUX, Yacine B. FAID, Julie HAZEMANN,
Yves MARIGNAC, Mycle SCHNEIDER

Sous la direction de : Yves MARIGNAC



Février 2003

Rapport commandité par **GREENPEACE**

• Sommaire

Les transports de l'industrie du plutonium en France

Une activité à haut risque

• Présentation de l'étude et principales conclusions	5
• <i>Conclusions sur le contexte des transports</i>	5
• <i>Conclusions sur les flux de matières</i>	6
• <i>Conclusions sur les risques associés aux transports</i>	7
• <i>Conclusions sur la réglementation applicable</i>	8
1. Le contexte des transports de plutonium	9
1.1. L'industrie française du plutonium	9
1.1.1. La gestion des combustibles en réacteur.....	9
1.1.2. L'industrie du plutonium	10
1.2. Les évolutions internationales	10
1.2.1. Les évolutions chaotiques de l'industrie du plutonium	10
1.2.2. Les transports de plutonium étranger.....	11
1.3. Perspectives	12
1.4. Conclusions sur le contexte des transports	14
2. Les flux de matières dans les transports de plutonium	15
2.1. Les transports dans la chaîne du plutonium	15
2.2. Les combustibles irradiés	17
2.2.1. Les combustibles UOX irradiés	17
2.2.2. Les combustibles MOX irradiés.....	18
2.2.3. Estimation des flux de combustibles irradiés	19
2.3. L'oxyde de plutonium	22
2.4. Les combustibles MOX neufs	23
2.4.1. Le MOX à destination d'EDF et les rebuts français.....	23
2.4.2. Le MOX fabriqué pour les clients étrangers	25
2.4.3. Les importations et l'entreposage de MOX frais étranger	25
2.5. Bilan des transports de plutonium en France	26
2.5. Conclusions sur les flux de matières	30
3. Les risques associés aux transports de plutonium	33
3.1. Les caractéristiques du plutonium	33
3.1.1. Les problèmes de criticité	33
3.1.2. Les problèmes de radioprotection	34
3.1.3. Le plutonium et la prolifération.....	34
3.2. Les effets radiologiques en conditions normales de transport	36
3.2.1. Les doses radiologiques induites par les matières contenant du plutonium.....	36
3.2.2. Les doses radiologiques dues aux transports.....	36
3.3. Les risques en conditions accidentelles	38
3.3.1. Les risques potentiels liés aux transports.....	38

3.3.2. Scénario d'accident ferroviaire sur un transport de combustible irradié	44
3.3.4. Scénario d'accident routier de transport de poudre d'oxyde de plutonium	51
3.4. Conclusions sur les risques associés aux transports	57
4. La réglementation applicable aux transports de plutonium	59
4.1. Cadre réglementaire général des transports	59
4.1.1. Les recommandations internationales	59
4.1.2. La réglementation sur le territoire français	60
4.1.3. La réglementation en matières d'emballages	62
4.2. Procédures, applications et pratiques	63
4.2.1. Sûreté dans le transport des matières radioactives	63
4.2.2. Itinéraires et informations	64
4.2.2. Les communes face au transport de matières radioactives	66
4.3. Accidents de transport	68
4.3.1. Prévention et situations d'accidents.....	68
4.3.2. Les régimes de responsabilité civile applicables en cas d'accident.....	70
4.4. Conclusions sur la réglementation applicable	70

Liste des annexes

A1. Annexe 1 La chaîne du plutonium.....	Erreur ! Signet non défini.
A1.1. Les réacteurs nucléaires alimentés en combustible standard	Erreur ! Signet non défini.
A1.2. L'entreposage temporaire des combustibles irradiés.....	Erreur ! Signet non défini.
A1.3. Les usines de plutonium (les installations de retraitement)	Erreur ! Signet non défini.
A1.4. Les usines de production de combustible MOX.....	Erreur ! Signet non défini.
A1.5. Les réacteurs nucléaires chargés en combustible MOX	79
A1.6. Les réacteurs à neutrons rapides.....	80
A1.7. Le plutonium militaire et les installations expérimentales.....	80
A1.8. Les tendances prévisibles de l'industrie du combustible au plutonium MOX	81
A2. Annexe 2 Les trajets du plutonium en France.....	83
A3. Annexe 3 Le décret du 12 mai 1981.....	84
A4. Annexe 4 Les emballages de transport du plutonium	91
A5. Annexe 5 Prescriptions applicables au transport de plutonium.....	92
A6. Annexe 6 Caractéristiques des isotopes du plutonium.....	95
A7. Annexe 7 Statistiques sur les accidents de transport de matières dangereuses	96

• Présentation de l'étude et principales conclusions

La présente étude met en lumière l'importance des transports de plutonium dans l'industrie nucléaire française dont le cœur de l'activité met en jeu des quantités de matières à haut risque souvent méconnues du public. Il s'agit d'une mise à jour enrichie de l'étude réalisée par WISE-Paris en 1995 pour le *Forum Plutonium* intitulée « *Les transports de l'industrie du plutonium* »¹, motivée par les évolutions importantes qu'a connues l'industrie française du plutonium, ainsi que la publication de nombreuses données concernant l'activité des transports depuis 1995. L'étude 2003 présente notamment l'ensemble des flux de plutonium qui sillonnent la France chaque année, ainsi qu'une analyse des risques associés à cette activité particulière des transports. Une mise en perspective de ces données dans un contexte politique et industriel en évolution rapide et permanente, ainsi que la description du cadre réglementaire dans lequel les transports de plutonium ont lieu, serviront de fil guide et de référence au lecteur pour mieux en comprendre les enjeux.

L'importance des transports dans « la chaîne » du plutonium, c'est-à-dire dans la succession d'étapes correspondant à des traitements industriels de natures différentes, est souvent sous estimée, y compris par l'industrie nucléaire elle-même, alors que cette activité est celle qui met en jeu les plus grandes quantités de plutonium de toute la chaîne nucléaire. Le plutonium, produit lors des réactions de fission se déroulant dans le cœur des centrales nucléaires, est transporté, contenu dans le combustible irradié, aux installations de La Hague. Là, les opérations de retraitement du combustible permettent de séparer le plutonium des autres composants radioactifs constituant le combustible une fois épuisé. Une partie du plutonium, alors isolé sous forme de poudre, est de nouveau transportée vers une des trois usines capables de fabriquer le combustible appelé MOX (Mixed Oxide Fuel, ou combustible d'oxyde mixte uranium-plutonium), situées à Cadarache et Marcoule en France et Dessel en Belgique. Une fois fabriqué sous forme de MOX, combustible ne représentant que 10 % environ des combustibles utilisés dans les centrales nucléaires françaises, il faudra de nouveau transporter ce plutonium vers les centrales afin qu'il y soit utilisé. Une fois irradié, le MOX peut rejoindre les installations de La Hague pour y être entreposé pour des durées encore inconnues, puisque le plutonium contenu dans le MOX usé n'est pas aujourd'hui destiné à être réutilisé un jour.

• Conclusions sur le contexte des transports

Alors que le programme surgénérateur a été abandonné et que la séparation du plutonium ne se justifie plus économiquement depuis longtemps et ne s'est jamais justifié énergétiquement, l'industrie du plutonium poursuit avec succès sa politique de fait accompli. L'industrie a créé un problème nouveau, les stocks de plutonium mais exploite le mythe de « le résoudre » en « l'absorbant » dans le combustible au plutonium, le MOX.

Au moment où l'industrie internationale du plutonium atteint son niveau d'activité le plus élevé, elle est touchée par une succession de scandales incluant la falsification de documentation technique, le non-respect de la réglementation de radioprotection, et la violation des règles de contrôle-qualité. L'impact de ces affaires en Allemagne, en Grande Bretagne et au Japon est considérable. En Allemagne, la première élection du chancelier Gerhard Schröder et la mise en place de la législation sur la sortie du nucléaire n'est pas dissociable de l'affaire des transports contaminés. En Grande Bretagne, le géant industriel BNFL a frôlé le dépôt de bilan et au Japon la mise en œuvre de l'ensemble du programme MOX a été reportée *sine die*.

¹ Pavageau, M., Hazemann, J. & Schneider, M., *Les transports de l'industrie du plutonium en France*, Rapport réalisé pour le Forum Plutonium, WISE-Paris, octobre 1995.

Seule l'industrie française semble intouchable. Les événements du 11 septembre 2001 ont peu impressionné les capitaines de l'industrie nucléaire. Alors que des poubelles restent scellées dans la capitale, les transports de plutonium ont toujours continué à rouler, sans interruption, sans modification majeure. Ainsi, la France est dans une situation où une industrie qui a perdu toute raison d'être dans un contexte international extrêmement défavorable impose à l'ensemble de la population française un tissu impressionnant de transports à haut risque.

• Conclusions sur les flux de matières

Le bilan exhaustif des transports de plutonium liés à la chaîne du combustible nucléaire en France témoigne de l'ampleur d'une activité à haut risque engendrée par l'industrie du plutonium. Bien que l'absence d'informations détaillées sur certaines étapes de la chaîne empêche d'établir une comptabilité précise des transports, une évaluation réaliste des flux permet de fixer les ordres de grandeur.

Selon nos estimations, **plus de 450 transports² de matériaux contenant au total près de 40 tonnes de plutonium circulent en France pendant une année.** La moitié seulement de ces emballages (52 %) et un gros tiers des quantités de plutonium (37 %) sont attribuables aux transports de combustibles irradiés français. Si l'on peut considérer La Hague comme site centralisé d'entreposage de combustibles irradiés – bien qu'il serait parfaitement possible d'entreposer les combustibles irradiés sur les sites des centrales nucléaires (option prise dans la plupart des pays nucléaires et nouvelle stratégie allemande) –, l'industrie du plutonium est donc responsable d'une multiplication par deux du nombre des transports de matières au plutonium, et par 2,5 des quantités de plutonium transportées sur le territoire français.

Cette augmentation est imputable pour moitié environ aux transports supplémentaires engendrés par le retraitement et la réutilisation du plutonium du combustible d'EDF, qui représentent respectivement 22 % et 34 % du nombre de transport et des quantités de plutonium transportées.

L'autre moitié de l'augmentation est due à l'ensemble des contrats passés par l'industrie du plutonium française avec des clients étrangers. Les importations de matières envoyées au site de retraitement de La Hague, les transferts nécessaires entre les usines de retraitement et de fabrication de MOX, et les retours d'une partie des matières vers les pays d'origine représentent 26 % du nombre total de transports et 28 % des quantités de plutonium qui circulent. Au total, les services aux clients étrangers impliquent pour la France le transit sur son territoire d'environ 120 transports par an, contenant plus de 10 tonnes de plutonium. Il faut noter que ces transports devraient être encore plus nombreux si l'équilibre était rétabli entre les flux d'entrée et de sortie du plutonium étranger en France.

L'accroissement du risque induit pour la population française peut se mesurer en rapportant les transports aux distances parcourues. En distance cumulée, ce sont plus de 250.000 kilomètres qui sont parcourus chaque année en France, sur route ou sur rail, par des emballages de transports contenant du plutonium dans le cadre de la chaîne du combustible. Sur ce total, près des trois cinquièmes, soit 140.000 kilomètres, sont parcourus, en proportion égale, par des transports liés à la réutilisation du plutonium français d'une part, et aux services aux électriciens étrangers de l'industrie du plutonium d'autre part.

Si l'on rapporte les quantités de plutonium transportées aux distances, l'activité de transport de matériaux contenant du plutonium atteint 22.000 « tonnes de plutonium.kilomètres » (tPu.km). Ceci équivaut au transport de 22 kg de plutonium – une quantité suffisante pour fabriquer une bombe – sur un million de kilomètres à travers le territoire français.

Bien qu'un plus grand nombre d'emballages soient transportés par la route que par voie ferroviaire, le rail représente la majorité des distances parcourues, soit l'équivalent cumulé de 138.000 kilomètres contre 116.000 à la route. Si l'on tient compte des quantités transportées, toutefois, la proportion s'inverse nettement, avec 13.500 tPu.km par route et 8.500 tPu.km par rail.

La répartition est relativement inégale entre les trois principales catégories de produits transportés. Les combustibles irradiés représentent la majeure partie des transports (près de 300 emballages sur 450). Mais les transports de plutonium entre l'usine de retraitement et les usines de fabrication de MOX, sous forme

² On appelle ici « transport » le trajet d'un emballage de combustible irradié, de poudre d'oxyde de plutonium ou de produit de fabrication de MOX non irradié, correspondant au chargement d'un wagon ou d'un camion.

de poudre d'oxyde, représentent presque un tiers des quantités de plutonium transportées. Du fait de l'éloignement entre ces usines, les transports de poudre d'oxyde de plutonium représentent 8.500 tPu.km – autant que les transports de combustibles irradiés – soit l'équivalent du **transport sur un million de kilomètres de 8,5 kg d'oxyde de plutonium sous forme de poudre** (davantage que la « quantité significative »³ correspondant à **la quantité minimale nécessaire pour la fabrication d'une bombe atomique**).

Les produits de fabrication des usines de MOX, combustibles neufs et rebuts, représentent sur tous les plans – quantités et distances – la part la moins importante. Toutefois les rebuts MOX, bien que 30 fois moins importants en quantité de plutonium que les combustibles MOX neufs, représentent presque autant d'emballages et parcourent davantage de distance. Ils pèsent moins de 1 % dans les quantités transportées mais contribuent pour près de 10 % à la distance cumulée du total des transports de plutonium.

• Conclusions sur les risques associés aux transports

Les matières nucléaires transportées par centaines de convois chaque année sont une source de dangerosité parmi les plus importantes de toutes les classes de matières dangereuses. Les dangers liés à la manipulation et au transport du plutonium touchent au risque de criticité (le déclenchement de réactions de fission), à sa très grande radiotoxicité et au problème de prolifération (le détournement de matières pour la fabrication d'une arme atomique). A ces risques classiques s'ajoute, illustré par les attaques du 11 septembre 2001, la menace d'actes terroristes contre les transports, ou de vol de plutonium pour son utilisation dans un engin explosif nucléaire ou dans une « bombe sale ».

Dans les conditions normales de transport, les niveaux de rayonnement neutronique et de contamination des transports, couplés au nombre d'emballages transportés chaque année induisent des doses non négligeables aux personnels concernés par le transport. Ils constituent de plus un risque pour la population lié à l'inhalation ou au dépôt de particules fortement rayonnantes, qui est généralement négligé.

La sûreté des transports de plutonium est, dans la logique développée par les autorités françaises, garantie par des contraintes réglementaires sur la résistance des colis de transport aux chocs (une chute de 9 m sur une surface indéformable, ou de 1 m sur une barre métallique) et à l'incendie (un feu d'hydrocarbures de 30 minutes à 800°C), ainsi qu'à l'immersion (sous 15 m d'eau pendant 8 heures).

Il apparaît que le dimensionnement mécanique et thermique des emballages de transport est au moins minimaliste voire insuffisant au regard des conditions de transport rencontrées sur la route et des hypothèses considérées pour le dimensionnement des infrastructures routières. Selon les statistiques sur les transports de matières dangereuses et les accidents, les contraintes réglementaires ne sont pas suffisantes pour garantir totalement la tenue des colis, donc le confinement des matières transportées ou la sous-criticité, dans un accident de la route sur 20 concernant les chocs, et dans un accident sur deux concernant les incendies.

En situation accidentelle, des relâchements de radioactivité significatifs peuvent être envisagés. Ceux-ci dépendent du type de transport (rail ou route), des quantités et des catégories de matières mises en jeu (combustible irradié, poudre d'oxyde de plutonium, combustible MOX non irradié), et des circonstances de l'accident.

Nous avons développé trois scénarios d'accident afin d'illustrer le potentiel de risque :

Un scénario d'**accident ferroviaire**, avec déraillement d'un convoi de **combustible irradié** dans un tunnel comme celui du Bernay, proche de Caen, puis percussion par un autre train, peut conduire à des relâchements de matières radioactives équivalents à un milliard de fois, par inhalation, la limite de dose annuelle de 1 mSv pour les personnes du public. Dans le cas d'un incendie provoqué dans le tunnel par le second train, les quantités pourraient être jusqu'à 500 fois plus importantes. Ce relâchement pourrait conduire à une contamination équivalente à celle observée dans la zone d'exclusion de Tchernobyl.

³ L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) définit la « quantité significative » (ou *significant quantity, SQ*) comme « la quantité approximative de matières nucléaires pour laquelle, en tenant compte de tout processus de conversion nécessaire, la possibilité de fabrication d'un engin explosif nucléaire ne peut pas être écartée » (traduction de l'anglais par WISE-Paris)

Un scénario simple d'**accident affectant un camion** de transport de poudre d'oxyde de **plutonium** pourrait conduire au relâchement de l'équivalent de quelques centaines de doses létales. Quelques dizaines de µg (microgrammes) de plutonium inhalés suffisent à provoquer un cancer mortel. En cas de choc important des conteneurs de plutonium, par exemple avec une pile de pont, le risque d'un accident de criticité ne peut être écarté. De plus, l'impact serait là encore beaucoup plus lourd en cas de percussio n par un camion-citerne et de feu d'hydrocarbures. Si un tel accident se produisait dans la banlieue nord de Lyon, plus de 6.000 personnes pourraient se trouver dans la zone de retombée, une ellipse de 12 km² environ. L'accident provoquerait quelques dizaines de cancers fatals.

Dans un scénario semblable, mais où l'**accident est déclenché par un acte de malveillance**, comme un tir à l'arme lourde sur le camion de plutonium, la zone pourrait atteindre 250 km² et concerner une population de 125.000 habitants. Susceptible de provoquer plus de 500 cancers fatals, il conduirait à la nécessité d'évacuer une partie de la ville de Lyon et de sa banlieue, sans espoir de retour pour une durée indéterminée.

L'élaboration détaillée de scénarios d'accident de ce type dépasserait largement le cadre de cette étude. Il serait souhaitable que les autorités compétentes chargent ses appuis techniques, en l'occurrence l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) des calculs détaillés des conséquences de ce type d'accident. Les résultats de ces études devraient être rendus publics et mis à disposition notamment des élus locaux confrontés au quotidien aux transports des matières au plutonium.

• Conclusions sur la réglementation applicable

Les transports contenant du plutonium sont soumis simultanément à deux corps principaux de réglementation, répondant à deux objectifs. Du point de vue de la sûreté, les transports des matières radioactives en général sont soumis à la réglementation sur le transport des matières dangereuses. Du point de vue de la prolifération, les matières dites matières nucléaires, sont soumises à la législation sur le contrôle et la protection physique, relative à la prévention des pertes, disparitions, vols et détournement pour éviter l'utilisation de ces matières à des fins militaires ou terroristes.

La sûreté repose sur trois « lignes de défense », qui sont respectivement l'emballage, la fiabilité des moyens de transport, et l'efficacité des moyens d'intervention mis en œuvre face à un accident ou un incident afin d'en prévenir les conséquences. En pratique, l'approche de la sûreté des transports repose essentiellement sur la garantie de l'intégrité de l'emballage. Des réglementations différentes s'appliquent aux différents types de transports, mais les critères de résistance des colis sont appliqués uniformément à toutes les voies de transport.

Les normes de performance des colis utilisés pour le transport des matières nucléaires distinguent les situations de routine, les conditions dites « normales » (incidents et accidents mineurs) et les conditions « accidentelles » de transport. Celles-ci intègrent la résistance au choc (chute de 9 m sur une surface indéformable, et chute de 1 m sur une barre métallique), la résistance à l'incendie (feu enveloppant d'hydrocarbure de 30 minutes à 800°C), et la résistance à l'immersion (sous 15 m d'eau pendant 8 heures et sous 200 m d'eau pendant 1 heure). La sûreté des transports en situation accidentelle tient entièrement dans le principe, hautement discutable, que cette série de critères permet de décrire l'ensemble des situations accidentelles possibles.

Dans le domaine de la sécurité, la protection contre le vol et le détournement de matières contenant du plutonium impose en particulier aux détenteurs et transporteurs de mettre en place des mesures destinées à assurer la protection des matières qu'ils détiennent ou transportent. Ces dispositions impliquent en particulier la protection par une escorte des transports de plutonium séparé, ou incorporé à du combustible MOX non irradié. Aussi, le transport par train de plutonium sous forme de poudre d'oxyde, et de MOX non irradié est interdit ; seuls les transports ferroviaires de combustibles irradiés sont autorisés.

Bien que les transports de plutonium exposent à des risques les populations le long de leur parcours, la réglementation ne prévoit aucune obligation d'information des maires du passage sur le territoire de leur commune de tels transports. De plus, un maire qui voudrait, pour la protection de ses administrés, interdire les transports de plutonium sur sa commune ne dispose pas explicitement des pouvoirs de police pour le faire.

1. Le contexte des transports de plutonium

La plupart des exploitants nucléaires dans le monde ont décidé de ne pas séparer le plutonium contenu dans les combustibles usés. Environ 90 % des combustibles irradiés déchargés des centrales nucléaires dans le monde ne sont ainsi pas envoyés vers des usines de retraitement mais entreposés en vue d'un stockage direct. L'incitation de séparer le plutonium s'est affaiblie de plus en plus face à des ressources en uranium naturel satisfaisantes pour plusieurs dizaines d'années de consommation mondiale et avec une distribution géographique ne mettant guère en question leur accessibilité. En conséquence, le prix de l'uranium sur les marchés spot n'a cessé de baisser depuis la fin des années 1970 pour atteindre en 2002 le niveau de 1974. Logiquement, dans sa comptabilité, EDF attribue une valeur zéro à ses importants stocks de plutonium (depuis 1996) et d'uranium du retraitement (depuis 1997).

Et pourtant, l'industrie du plutonium a connu dans les années 1990 un essor considérable, notamment dû à la mise en service de nouvelles installations de retraitement en Grande-Bretagne et en France. La croissance continue des niveaux de production s'est mécaniquement traduite par une augmentation du nombre et du volume global des transports. Le début des années 2000 marque cependant un ralentissement général de l'activité de cette industrie, dont les perspectives à court et moyen terme sont très limitées. La chaîne du plutonium est une succession complexe d'étapes⁴ qui s'étale sur plusieurs années. Il existe donc un décalage dans le temps entre le déclin des contrats de retraitement, ses effets sur la production et ses conséquences sur les transports. Ceux-ci ont connu au cours des dernières années une progression constante.

1.1. L'industrie française du plutonium

1.1.1. La gestion des combustibles en réacteur

Source essentielle du plutonium dans l'aval de la chaîne du combustible, le parc de 58 réacteurs à eau sous pression d'EDF joue un rôle majeur dans les flux de plutonium en France.

Bien que le parc soit aujourd'hui stable, les flux de plutonium associés ne sont pas constants ; ils varient en fonction de l'évolution de la gestion du combustible d'EDF. La volonté d'optimiser la gestion du combustible à l'uranium tend à augmenter les taux d'enrichissement initiaux en uranium fissile et les taux d'épuisement du combustible, dit taux de combustion. Elle entraîne également une augmentation des teneurs en plutonium dans le combustible irradié.

Cette montée progressive du plutonium dans les combustibles usés à l'uranium, ou UOX (oxyde d'uranium), depuis le démarrage des premiers grands réacteurs à eau sous pression français en 1977, a donc eu de lourdes répercussions sur l'évolution des flux de plutonium en France. Avec environ 28 GWj/t (gigawatt-jours par tonne) de taux de combustion dans les années 1980, et des taux d'enrichissement proches de 3 % en uranium fissile (uranium-235), contre 45 à 50 GWj/t aujourd'hui et 3,7 à plus de 4 % d'enrichissement, la différence de teneur en plutonium dans les combustibles déchargés, soit moins de 0,9 % contre plus de 1,1 % aujourd'hui, semble mineure. Cependant, le développement rapide du parc nucléaire français dès la première moitié des années 1980, avec des mises en service jusqu'au début des années 1990, a mené très rapidement au déchargement de quelques centaines de tonnes de combustible irradié à près de 1.000 t dès la fin des années 1980. Sur des quantités aussi importantes, des variations de teneur en plutonium de 0,2 % correspondent à 2 t d'une matière dont quelques kg peuvent servir à faire une bombe et dont l'inhalation de l'ordre de 30 µg (millionnièmes de gramme) constituent une dose létale.

⁴ La chaîne du plutonium et les installations associées en France sont décrites de façon détaillée dans l'Annexe 1.

Les années 1990 ont été marquée par une modification majeure dans la gestion des combustibles en réacteur et donc dans les flux de plutonium français, avec l'introduction d'un combustible sur base mixte d'uranium et de plutonium appelé MOX (*Mixed Oxide Fuel* en anglais). Le fait que le MOX vienne en remplacement de l'UOX dans le cœur de quelques réacteurs français, a provoqué une augmentation significative des transports de plutonium en France. D'une part le MOX frais, enrichi en plutonium à 5 % ou davantage, remplace une part de l'UOX en réacteur. D'autre part, une fois irradié, le combustible au plutonium contient encore du plutonium en bien plus grande quantité que l'UOX irradié. Enfin, il faut, pour fabriquer le MOX, transporter le plutonium séparé par le retraitement des combustibles UOX irradiés dans les usines de La Hague en Basse-Normandie, jusqu'aux usines de fabrication de MOX, situées dans le sud, à l'autre bout de la France.

1.1.2. L'industrie du plutonium

Le dispositif industriel français concernant le plutonium⁵ a connu au cours des années 1990 un développement très contrasté. Avec la mise en service de l'usine COGEMA de fabrication de MOX, MELOX, à Marcoule en 1994, et sa montée en puissance rapide pour atteindre 100 % de son autorisation de production dès 1997, c'est la filière de transport de plutonium français la plus importante qui a vu le jour. Parallèlement, les usines de retraitement de La Hague, exploitées par COGEMA, ont connu leur plus haut niveau historique de production entre 1995 et 1999, la pointe de production se situant en 1996. Enfin, l'autre usine française de fabrication de MOX, ATPu à Cadarache, exploitée par COGEMA également, a vu sa production progresser régulièrement depuis 1996 pour culminer à son plus haut niveau historique en 2000. Même si l'année 2000 est un tournant pour l'activité de La Hague, qui a vu sa production annuelle baisser de manière significative par manque de contrats étrangers, l'industrie du MOX reste à de très hauts niveaux de production.

Le développement de la filière MOX a dès son origine constitué un substitut à la filière initialement programmée des surgénérateurs. Celle-ci est en voie d'abandon en France : la mise à l'arrêt définitif du réacteur à neutrons rapides Superphénix, en décembre 1998, a marqué un véritable tournant pour l'industrie du plutonium en France. Il ne subsiste qu'un surgénérateur plus petit et plus ancien, Phénix, qui après avoir été réorienté vers des activités de recherche sur la transmutation, a dû être arrêté pour des raisons de sûreté en 1999. L'autorité de sûreté nucléaire a donné en janvier 2003 son autorisation au redémarrage de Phénix, avec une puissance limitée aux deux-tiers et pour un maximum de six cycles de fonctionnement⁶. La fin de l'exploitation industrielle des surgénérateurs a contribué à une légère baisse des flux de plutonium en France, puisqu'ils utilisaient du combustible à base de plutonium, comme le MOX, mais avec des taux d'enrichissement en plutonium supérieurs d'un facteur cinq.

1.2. Les évolutions internationales

1.2.1. Les évolutions chaotiques de l'industrie du plutonium

L'industrie du plutonium a connu, au niveau international, une incroyable succession de scandales depuis la fin des années 1990. Elle a pourtant, non sans heurts, poursuivi son développement. Toutefois les pressions politiques et économiques pour l'abandon des programmes de retraitement et d'utilisation du plutonium se font plus fortes, conduisant aujourd'hui à une tendance marquée au reflux de cette industrie.

En France et en Allemagne, le scandale des transports contaminés, qui a éclaté début 1998, a révélé que depuis des années des niveaux de contaminations jusqu'à plusieurs milliers de fois supérieurs aux limites autorisées avaient été dissimulés par COGEMA, sa filiale Transnucléaire et les électriciens sur des transports de combustibles usés destinés au site de La Hague.⁷ En septembre 1999, en Grande-Bretagne, c'est au tour de BNFL, exploitant des installations de Sellafield d'être au cœur de la tourmente, après la

⁵ Des cartes des transports de plutonium entre les différentes installations en France sont rassemblées en Annexe 2.

⁶ Direction générale de la sûreté et de la radioprotection nucléaire, *Réacteur Phénix (INB 71). Bilan du réexamen de sûreté et reprise du fonctionnement en puissance*, Note d'information, 7 janvier 2003.

⁷ Voir *Plutonium Investigation* n°6/7 « Spécial Transports », juin 1998.

découverte de falsifications de contrôle-qualité de combustible MOX⁸. Le même type de problème – sans que la bonne fois de l’exploitant ait été mise en cause – a touché par la suite l’ATPu, usine de fabrication de MOX de COGEMA à Cadarache, au début de l’année 2000⁹.

Puis début 2001 éclate l’affaire des transports « secrets » d’Hanau, en Allemagne, révélée par WISE-Paris¹⁰: Entre 1998 et 2000, la COGEMA a secrètement poursuivi ses importations des combustibles exotiques de type MOX frais impropres à l’utilisation en réacteur en provenance de l’usine d’Hanau, alors que ces transports de matières radioactives étaient considérés comme suspendus depuis le scandale des transports contaminés de 1998. De plus, une polémique s’est développée sur la régularité de ces importations au vu de l’absence d’autorisation spécifique pour retraiter ces matières de COGEMA.

Paradoxalement, les scandales de 1999 à 2001 de contrôle-qualité concernant le n’ont pas empêché le démarrage de la Sellafield MOX Plant (SMP), la deuxième plus grande usine de fabrication de MOX du monde, ni les usines d’Europe continentale de connaître leurs plus hauts niveaux de production.

Parallèlement, l’affaire des transports contaminés mi-1998, a joué un rôle important dans la révision des critères de sûreté et a porté l’attention sur la radioprotection dans ce domaine. Mais les importations de matières nucléaires en France se sont poursuivies. La France reste ainsi une terre d’accueil pour les combustibles irradiés étrangers, mais également désormais pour des matières nucléaires exotiques contenant du plutonium, notamment des combustibles de recherche australiens et belges et des combustibles MOX frais allemands impropres à l’utilisation en réacteurs.

1.2.2. Les transports de plutonium étranger en France

De nombreux pays ont été clients de COGEMA-La Hague, et ont envoyé des matières contenant du plutonium en France : Allemagne, Belgique, Pays-Bas, Espagne, Suisse, Suède, Japon, Australie. Parmi ceux-ci, seuls l’Allemagne, et, à petite échelle, les Pays-Bas et la Suisse continuent leurs envois de combustibles commerciaux vers la France, dans la limite des contrats actuels, dont l’exécution sera achevée dans les prochaines années.

Ces importations donnent lieu, après traitement dans la chaîne industrielle française, à des retours de déchets vers les pays d’origine, avec un décalage pouvant atteindre ou dépasser la vingtaine d’années. De plus, le retour de tout le plutonium n’apparaît pas certain : dans un cas au moins, pour les petites quantités contractées par l’ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation), le plutonium contenu dans les combustibles expédiés à La Hague ne doit explicitement pas être rendu à l’Australie.

Au total, 33,5 tonnes de plutonium étranger issu du retraitement étaient officiellement¹¹ entreposées en France fin 2001. Auxquels s’ajoutent le plutonium contenu dans les combustibles irradiés et autres matières provenant de clients étrangers en attente de retraitement. La Hague a lentement vu glisser son activité de la simple production de déchets et des transports de combustibles usés associés, vers un véritable centre d’entreposage de toutes matières liées de près ou de loin à l’industrie du plutonium. Sans planification précise concernant leur traitement, parfois même sans autorisation permettant leur retraitement, ces matières constituent une véritable activité d’importation du plutonium. Outre le MOX usé allemand qui s’accumule année après année à La Hague, les combustibles en provenance de l’usine de Hanau déjà cités, COGEMA a importé des combustibles de recherche de type MTR (Materials Testing Reactor) en provenance du réacteur de recherche belge BR2 et de l’ANSTO au début de 2001.

⁸ Nuclear Installations Inspectorate of the HSE, *An Investigation Falsification of Pellet Diameter Data in the MOX Demonstration Facility at the BNFL Site and the Effect of this on the Safety of MOX Fuel in Use*, février 2000. Voir <http://www.wise-paris.org/english/reports/000221HSEMoxFalsification.pdf>
Voir aussi les différents articles en anglais sur le sujet sur le site de WISE-Paris, <http://www.wise-paris.org>

⁹ Voir « L’ATPu et le contrôle de la fabrication de MOX », *Plutonium Investigation* n°20 « Spécial Cadarache », avril-mai 2001. <http://www.wise-paris.org/francais/nosbulletins/20/sommaire.html>

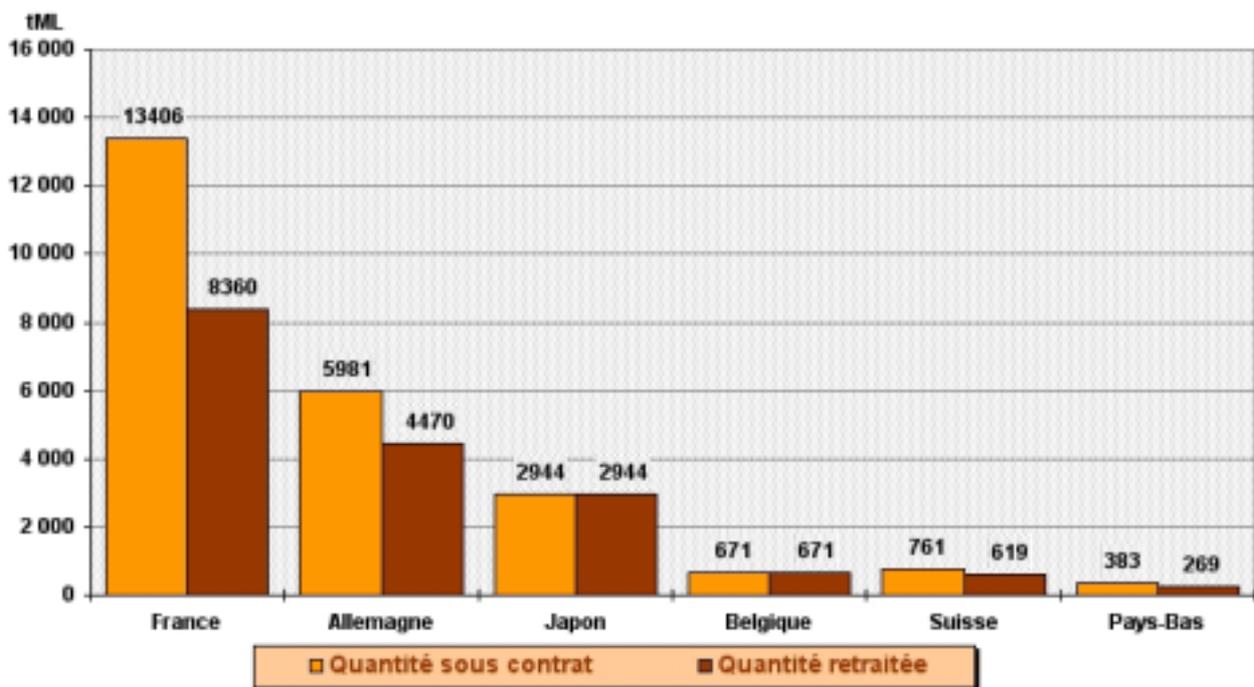
¹⁰ Voir « Transports secrets et stockage illégal », WISE-Paris, mars 2001 et briefing associé. http://www.wise-paris.org/francais/nosbreves/annee_2001/nosbreves010306.html

¹¹ Déclaration de la Mission permanente de la France auprès de l’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA), 12 septembre 2002, INFCIRC/549/Add.5/6.

1.3. Perspectives

Les perspectives de l'industrie du plutonium en France sont globalement à la baisse. En effet, les flux à la source de la filière – les arrivées à La Hague – vont significativement se réduire. Les contrats actuels avec les clients étrangers sont achevés, ou en voie d'achèvement, ainsi que l'illustre la figure 1. Aucun renouvellement de contrat de ce type n'est envisagé aujourd'hui par les principaux clients étrangers. Au contraire, la plupart se sont désengagés, soit par décision politique d'arrêter le retraitement, comme la Belgique, soit par choix de développer leur propre activité de retraitement, comme le Japon. L'Allemagne a, dans le cadre de sa loi de sortie du nucléaire, fixé à 2005 l'échéance pour les derniers envois de combustible usé en France. Seul EDF, l'exploitant français, a renouvelé son engagement de retraitement, dans un protocole d'accord conclu en septembre 2001, pour une durée de six ans, assurant à La Hague une activité de l'ordre de 50 % de sa capacité.

Figure 1 État d'avancement des contrats de retraitement à La Hague au 31 janvier 2002¹² (en tonnes de métal lourd, tML)



Source : Commission Spéciale et Permanente d'Information, bulletin n°10, avril 2002

COGEMA a anticipé cette évolution, demandant dès 1999 une révision des autorisations de ses usines de La Hague pour pouvoir, à capacité constante, élargir la gamme des matières dont le retraitement – on peut même parler de « traitement » – serait autorisé sur les chaînes de ses usines UP2-800 et UP3-A. Les décrets renouvelant les autorisations de création des deux usines ont été publiés le 11 janvier 2003. Ils permettent effectivement à COGEMA de traiter, outre toute la gamme imaginable des combustibles irradiés, toute matière contenant du plutonium (ou de l'uranium). Des filtres de l'usine ATPu Cadarache, contaminés au plutonium, sont par exemple déjà entreposés à La Hague dans l'attente d'un traitement. Une telle orientation de l'activité de La Hague pourrait donner lieu, dans les prochaines années, à une multiplication des transports de matières contenant du plutonium.

Du côté de la fabrication de combustible MOX, la tendance est également au déclin. Comme pour le retraitement, la part prépondérante de l'activité dans ce domaine sera assurée par le contrat conclu avec l'électricien français, EDF, qui prévoit la fourniture de 100 tML (tonnes de métal lourd, uranium et

¹² COGEMA n'a pas à notre connaissance publié de chiffres plus récents ; en règle générale COGEMA refuse de nous communiquer ce type de données de base.

plutonium) de combustible MOX par an jusqu'en 2007. Mais les années fastes des contrats avec les clients étrangers sont terminées.

En réponse à une demande de longue date de l'autorité de sûreté, COGEMA a annoncé¹³, le 21 janvier 2003, « l'arrêt de la production commerciale » à l'ATPu de Cadarache au 31 juillet 2003. Le gouvernement avait entre temps accepté le « chantage », selon l'ancienne expression de l'autorité de sûreté¹⁴, de COGEMA en ouvrant le 8 janvier 2003 une enquête publique à Marcoule pour le transfert de la production de l'ATPu vers MELOX.

Ce probable transfert de production ne permet pourtant pas de croire à un rebond d'activité dans les prochaines années. Les engagements contractés par les industriels allemands avec COGEMA (et son homologue BNFL) constituent aujourd'hui la principale caution de l'industrie du plutonium à l'échelle européenne. Mais ces engagements sont limités : ainsi, la production assurée par l'ATPu, entièrement dédié à la clientèle allemande, est condamnée à disparaître à un terme plus ou moins proche, du fait de l'arrêt, au plus tard en juillet 2005, de l'envoi de combustibles usés à La Hague. Du reste, le gouvernement n'a pas saisi l'occasion de l'enquête publique sur l'augmentation de capacité de MELOX pour demander une extension à 195 tML annuelles – quantité correspondant à la capacité théorique de l'usine aujourd'hui –, se contentant d'une augmentation des 101 tML actuelles à 145 tML.

Les espoirs de COGEMA de voir l'activité MOX pour l'Allemagne progressivement remplacée par d'autres contrats étrangers, essentiellement avec le Japon, semblent eux aussi devoir être abandonnés pour plusieurs années, à la suite des scandales successifs qui ont ébranlé l'industrie nucléaire au Japon depuis 1999. La révélation, en septembre 2002, des falsifications de documents de sûreté par les principales compagnies électriques japonaises, dont TEPCO, est intervenue à la veille du premier chargement en combustible MOX d'un réacteur japonais ; elle a rapidement conduit à l'annonce du gel du programme « Pluthermal » d'utilisation du plutonium dans les réacteurs thermiques, dont les fondements sont de plus en plus contestés.

Reste que l'arrêt de la production des installations ne signifie pas la fin immédiate des transports. Le directeur de COGEMA Cadarache prévoit ainsi qu'après la fin de la production commerciale à l'ATPu il faudra encore, « pour vider et nettoyer l'installation, (...) produire du combustible jusqu'en 2006 »¹⁵. Les rebuts ainsi fabriqués pourront, dans le cadre des nouvelles autorisations accordées aux usines de La Hague, être renvoyés au lieu de provenance de leur plutonium afin que celui-ci soit, en principe au moins, à nouveau traité !

La fermeture annoncée de l'ATPu soulève des questions sur deux dossiers particuliers, dont l'analyse détaillée sort du champ de cette étude mais qui peuvent avoir des répercussions importantes en termes de transport de plutonium sur le sol français.

Le premier concerne la volonté affichée par le Gouvernement américain d'accélérer son programme d'« élimination » des surplus de plutonium militaire en faisant fabriquer en Europe quatre « assemblages tests » (lead test assemblies, ou LTA) de combustible MOX utilisant ce plutonium. Après un blocage politique en Belgique sur le projet de faire fabriquer ces assemblages dans l'usine P0 de Dessel, l'ATPu reste la seule alternative. Un tel projet conduirait à des transports exceptionnels de plutonium de qualité militaire américain sur le territoire français, depuis un port de débarquement jusqu'à Cadarache. Toutefois, l'autorité de sûreté nucléaire française affirme ne pas avoir reçu, à la date du 13 février 2003, de demande pour la fabrication de ces LTA à l'ATPu¹⁶.

¹³ COGEMA, *Les conditions de mise à l'arrêt de l'usine de Cadarache soumises à l'avis du Comité central d'entreprise de COGEMA*, communiqué du 21 janvier 2003.

¹⁴ Voir Rouy E., Marniac Y., Coeytaux X., Schneider M., *L'ATPu (Atelier de Technologie du Plutonium) à Cadarache*, Briefing WISE-Paris, 21 août 2000.

¹⁵ Déclaration de Gilbert Daverny dans *Les Echos*, « Anne Lauvergeon annonce la fermeture de l'usine Cogema de Cadarache », 21 janvier 2003.

¹⁶ Courriel électronique du 13 février 2003 de M. Aguilar, Directeur, Sous-direction cycle du combustible et transports, DGSNR.

Sur le dossier du programme américain de fabrication des LTA, voir par exemple sur le site *Plutonium Investigation* « Abandon du programme d'immobilisation du plutonium militaire américain en faveur du MOX –

Le second touche au redémarrage du réacteur à neutrons rapides Phénix, dont l'autorité de sûreté nucléaire a autorisé l'exploitation pour six cycles de fonctionnement encore. Le réacteur aura besoin de combustible contenant du plutonium pour six années. Cette décision devrait donc conduire à la reprise des transports de combustible non irradié à hautes teneur de plutonium en France. A condition toutefois qu'une solution soit trouvée pour fabriquer les assemblages correspondants : aucune information n'a été fournie par le CEA, exploitant de Phénix, ou les autorités pour expliquer où pourront être fabriqués ces combustibles après la fermeture de l'ATPu, la seule installation en capacité technique et réglementaire d'assurer cette production aujourd'hui.

Ces deux dossiers sont en marge du mouvement général de recul de l'industrie du plutonium. Mais du fait des temps très longs des différentes étapes de la chaîne du plutonium, les évolutions de l'industrie du plutonium sont globalement très lentes, et les décisions les plus mineures ont une portée durable. Dans ce contexte, il est important de noter que l'ensemble des décisions de janvier 2003 en France concernant les usines de La Hague, ATPu et MELOX, qui ouvrent la voie aux évolutions souhaitées par l'industriel, ont été prises alors même que le Gouvernement lançait un « *grand débat national* » de plusieurs mois sur l'énergie, dont un des thèmes annoncé est le nucléaire et la gestion du cycle du combustible.

1.4. Conclusions sur le contexte des transports

Alors que le programme surgénérateur a été abandonné et que la séparation du plutonium ne se justifie plus économiquement depuis longtemps et ne s'est jamais justifié énergétiquement, l'industrie du plutonium poursuit avec succès sa politique de fait accompli. L'industrie a créé un problème nouveau, les stocks de plutonium mais exploite le mythe de « le résoudre » en « l'absorbant » dans le combustible au plutonium, le MOX¹⁷.

Au moment où l'industrie internationale du plutonium atteint son niveau d'activité le plus élevé, elle est touchée par une succession de scandales incluant la falsification de documentation technique, le non-respect de la réglementation de radioprotection, et la violation des règles de contrôle-qualité. L'impact de ces affaires en Allemagne, en Grande Bretagne et au Japon est considérable. En Allemagne, la première élection du chancelier Gerhard Schröder et la mise en place de la législation sur la sortie du nucléaire n'est pas dissociable de l'affaire des transports contaminés. En Grande Bretagne, le géant industriel BNFL a frôlé le dépôt de bilan et au Japon la mise en œuvre de l'ensemble du programme MOX a été reportée *sine die*.

Seule l'industrie française semble intouchable. Les événements du 11 septembre 2001 ont peu impressionné les capitaines de l'industrie nucléaire. Alors que des poubelles restent scellées dans la capitale, les transports de plutonium ont toujours continué à rouler, sans interruption, sans modification majeure. Ainsi, la France est dans une situation où une industrie qui a perdu toute raison d'être dans un contexte international extrêmement défavorable impose à l'ensemble de la population française un tissu impressionnant de transports à haut risque.

Assemblages d'essai fabriqués en Europe ? », 27 mai 2002
http://www.wise-paris.org/francais/nosbreves/annee_2002/nosbreves020527.html

¹⁷ Incroyable mais vrai : lorsque le premier réacteur français a été chargé en MOX en 1987, il n'y avait pratiquement pas de stock de plutonium ; 15 ans plus tard, alors qu'une vingtaine de réacteurs sont autorisés à charger du MOX, le stock de plutonium a dépassé les 45 tonnes.

2. Les flux de matières dans les transports de plutonium

La France s'est dotée d'importantes installations par lesquelles transitent du plutonium : usines de retraitement et usines de fabrication du combustible MOX. L'Annexe 1 détaille les différentes installations qui constituent la chaîne du combustible pour les réacteurs électronucléaires. Ces usines sont utilisées aussi bien pour l'électricien national EDF que pour des électriciens étrangers. Avec le fonctionnement à pleine capacité des usines françaises de fabrication MOX, ainsi que l'activité de retraitement des combustibles français et l'exploitation de l'ensemble du parc électronucléaire, la chaîne du plutonium français a atteint depuis 1998 un point culminant. A l'inverse, l'activité est en diminution constante en ce qui concerne le plutonium étranger et devrait continuer son déclin vers une activité minimum en 2006.

2.1. Les transports dans la chaîne du plutonium

Un regard sur le nombre de transports de matières nucléaires¹⁸ en général en France montre que près de 64 % des transports se font par route et près de 22 % par rail (voir Tableau 1). Les transports par voie maritime et aérienne (respectivement moins de 14 % et moins de 1 %) restent marginaux. En outre, dans les catégories I et II, qui incluent les transports de plutonium¹⁹, plus de 96 % se fait par route.

Tableau 1 Nombre de transports de matières nucléaires par voie en 1998 par catégorie au sens du décret n°81-512 du 12 mai 1981

	Routière	Ferroviaire	Maritime	Aérienne	TOTAL
Catégorie I	181	0	0	1	182
Catégorie II	4	0	4	2	10
Catégorie II (irradiés)	103	153	15	0	271
Catégorie III	581	140	169	8	898
Total	869	293	188	11	1.361

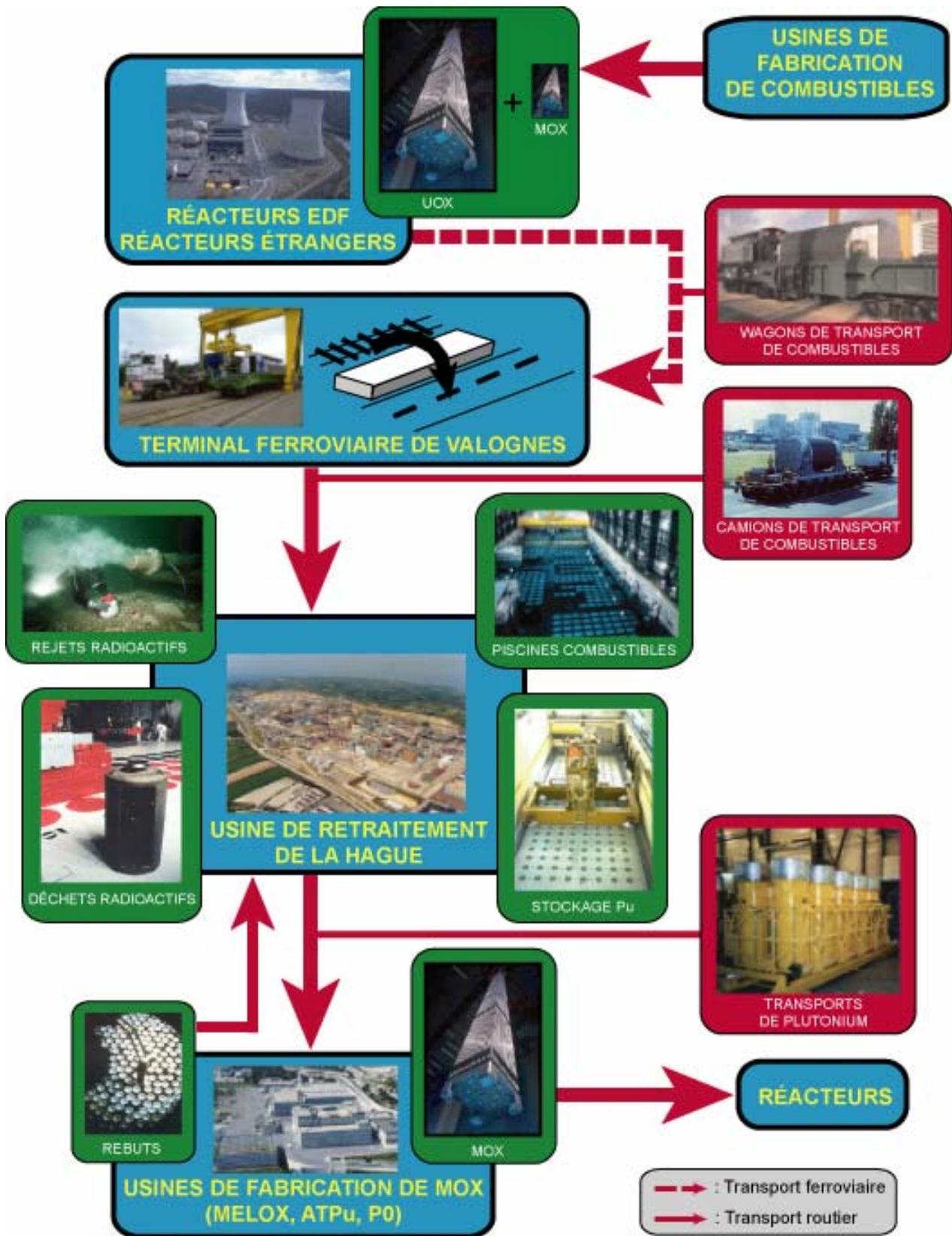
Source: SPCMN 98

Le schéma de la Figure 2 illustre les transports de la chaîne du plutonium et les installations entre lesquelles ils ont lieu. Ces matières contiennent toutes du plutonium, qu'il soit sous forme séparée ou bien contenu dans des combustibles irradiés ou neufs. Le combustible standard à l'uranium ou UOX (uranium oxyde), qui alimente le parc des réacteurs à eau sous pression EDF ne contient que de l'uranium faiblement enrichi quand il est introduit en réacteur. Le plutonium se forme alors pendant le séjour du combustible dans le réacteur. Son retraitement, une fois déchargé du réacteur, produit notamment du plutonium séparé qui peut servir de matière fissile en remplacement de l'uranium fissile, dans le combustible appelé MOX (mixed oxide). Ce dernier est alors chargé, en remplacement de l'UOX, dans certains des réacteurs d'EDF où le plutonium est alors partiellement consommé. Les combustibles MOX irradiés sont à leur tour déchargés puis sont entreposés dans les usines de retraitement de La Hague. Les combustibles MOX n'ont pas été, au moins jusqu'en 2002, retraités, sauf pour des campagnes expérimentales totalisant moins de 10 tonnes.

¹⁸ Les matières que nous étudions ici sont des matières dites « nucléaires ». Ces matières sont au nombre de six : plutonium, uranium, deutérium, thorium, lithium-6, tritium.

¹⁹ Les catégories de matières nucléaires sont celles prises en compte pour leur protection, définies en annexe du décret n°81-512 du 12 mai 1981 relatif à la protection et au contrôle des matières nucléaires (JO du 14 mai 1981). Les principales dispositions de ce classement sont présentées dans l'Annexe 3.

Figure 2 La chaîne du plutonium et les transports associés



Source : WISE-Paris, 2003

2.2. Les combustibles irradiés

2.2.1. Les combustibles UOX irradiés

Une fois déchargés d'un réacteur, les éléments combustibles sont transportés dans des conteneurs dédiés, appelés châteaux de transport en raison de leurs dimensions (voir l'Annexe 4 pour plus de détails sur les emballages de transport) et de leur poids. Ils peuvent être transportés indifféremment par rail ou par route, sur des plates-formes adaptées.

Les châteaux de transport doivent permettre le confinement des matières transportées dans des conditions normales et accidentelles de transport. Ils sont équipés d'un blindage neutronique et radiologique, ainsi que d'un dispositif passif d'évacuation de l'énergie thermique que dégagent les combustibles irradiés. L'emballage doit aussi assurer le maintien de la géométrie des assemblages combustibles transportés dans des conditions accidentelles de transport, afin d'empêcher qu'un rapprochement des assemblages en cas d'accident n'entraîne une réaction en chaîne, dite criticité.

Les conteneurs essentiellement utilisés en France sont les conteneurs de la société COGEMA Logistics, anciennement Transnucléaire, filiale de COGEMA (51 %) et de Framatome (49 %) spécialisée dans le transport de matières nucléaires. Les châteaux de transport appelés TN 12 et TN 13 (pour Transnucléaire) peuvent contenir jusqu'à 12 assemblages combustibles déchargés d'un réacteur à eau pressurisée (REP)²⁰ de 900 MWe, et les châteaux de transport TN 17 jusqu'à 7 assemblages combustibles d'un réacteur de 1 300 MWe ou 1 450 MWe.

Un assemblage combustible de réacteur 900 MWe contient, avant irradiation, 461,7 kg d'uranium enrichi entre 3,1 et 4,2 % en uranium fissile (uranium-235), et un assemblage combustible pour réacteur 1 300 MWe en contient 538,5 kg. Après irradiation, les assemblages combustibles usés contiennent une fraction de plutonium variable en fonction de l'épuisement du combustible (taux de combustion) lors de son séjour en réacteur, de l'ordre de 1 %. Après une période de refroidissement sur site d'environ un an, les combustibles UOX irradiés sont transportés aux usines de retraitement de La Hague afin que 850 t des presque 1 100 t déchargées soient retraitées, au terme d'une attente, qui s'élève en moyenne à 8 ans aujourd'hui, dans les piscines d'entreposage de La Hague.

Tableau 2 Caractéristiques des combustibles UOX utilisés en France

Type de réacteur	REP 900 MWe	REP 1 300 MWe	REP 1 450 MWe
Poids d'une pastille (gML)	6,43	6,43	6,43
Nombre de pastilles / crayon	272	317	317
Nombre de crayons / assemblage	264	264	264
Nombre d'assemblages / cœur	157	193	205
Poids d'un assemblage (kgML)	461,7	538,5	538,5
Dimensions d'un assemblage (m)	0,2 x 0,2 x 4,06	0,2 x 0,2 x 4,8	0,2 x 0,2 x 4,8
Type de conteneur de transport pour le combustible utilisé	TN 12 ou TN 13	TN 17	TN 17
Nombre maximum d'assemblages par conteneur	12	7	7
Poids total du cœur (tML)	72,5	103,9	110,4

Source : CEA, Mémento sur l'énergie, 2001

²⁰ EDF exploite 58 réacteurs à eau pressurisée (ou à eau sous pression), dont 34 de 900 MWe, 20 de 1.300 MWe et 4 de 1.400 MWe.

2.2.2. Les combustibles MOX irradiés

Les assemblages combustibles MOX pour les réacteurs standard sont des assemblages du même type que pour les combustibles à uranium. D'aspect extérieur, les assemblages combustibles MOX sont absolument identiques aux assemblages combustibles à l'uranium pour le même réacteur. La différence réside dans la matière fissile utilisée, à savoir entre 5 et 7 % de plutonium en moyenne par assemblage initialement, contre 3,1 à 4,2 % d'uranium-235 dans l'UOX.

Le combustible MOX utilisé peut contenir quatre à cinq fois plus de plutonium, selon la teneur initiale, que le combustible standard utilisé (qui en contient autour de 1 %). De plus, à taux de combustion égal, les émissions neutroniques du combustible MOX utilisé sont dix fois plus importantes que celles du combustible standard utilisé²¹.

Les châteaux de transport des assemblages utilisés standard à l'uranium ont été adaptés au transport des assemblages de MOX utilisés, en prenant la dénomination TN 12/2. L'augmentation des émissions neutroniques, dues à la teneur en actinides et produits de fission plus élevée dans le MOX irradié que dans les combustibles standards, a été compensée par un renforcement des protections neutroniques internes. D'autres dispositions tiennent compte de différences comme le dégagement thermique deux à trois fois plus important et le risque de criticité spécifique aux teneurs plus élevées en plutonium. Malgré ces modifications, et bien que le TN 12/2 soit censé pouvoir accepter jusqu'à 12 assemblages de MOX utilisés, la pratique est de transporter seulement quatre assemblages au maximum par conteneur.

Après une période de refroidissement sur site de trois à quatre ans, les combustibles MOX sont envoyés aux usines de retraitement de La Hague. Cependant, même si à La Hague, les combustibles irradiés MOX sont entreposés sous eau dans des piscines, comme les combustibles UOX irradiés, le MOX utilisé n'est pas retraité à l'heure actuelle. En effet, EDF ne prévoit pas de retraiter les combustibles MOX irradiés, notamment en raison de la moins bonne qualité du plutonium qu'ils contiennent²² mais également à cause du surcoût engendré par un nouveau retraitement (voir Annexe 1). Le devenir des combustibles MOX irradiés reste incertain, COGEMA affichant une volonté de retraiter ces combustibles²³, mais il semble probable que ces combustibles seront, dans un futur à définir, transportés de nouveau, vers une installation de stockage.

Tableau 3 Caractéristiques des combustibles utilisés dans un réacteur 900 MWe « moxé »

Type de combustible	UOX	MOX
Poids d'une pastille (gML)	6,43	6,43
Nombre de pastilles / crayon	272	272
Nombre de crayons / assemblage	264	264
Nombre d'assemblages / cœur	105	52
Poids d'un assemblage (kgML)	461,7	461,7
Dimensions d'un assemblage (m)	0,2 x 0,2 x 4,06	0,2 x 0,2 x 4,06
Type de conteneur de transport pour le combustible utilisé	TN 12 ou TN 13	TN 12/2
Nombre maximum d'assemblages par conteneur	12	4
Poids total du cœur (tML)	48,5	24,0

Source : CEA, Mémento sur l'énergie, 2001

²¹ Nuclear Engineering International, février 1993.

²² La part des isotopes fissiles du plutonium, nécessaires aux réactions de fissions, diminue lors du passage du MOX en réacteur. Retraiter ces combustibles nécessiterait à terme un sur-enrichissement du plutonium extrait, afin de compenser la perte en isotopes fissiles.

²³ En 1998, COGEMA a retraité 4,9 t de MOX utilisé en provenance d'un programme expérimental des années 1970 afin d'en démontrer la faisabilité technique. Aucun autre assemblage MOX utilisé français n'a été retraité au 31 décembre 2002.

2.2.3. Estimation des flux de combustibles irradiés

Le Tableau 4 présente une estimation du flux annuel des combustibles irradiés en provenance des réacteurs EDF, à destination des usines de retraitement de La Hague, basée sur la gestion des combustibles du parc nucléaire français, au 31 octobre 2002. Cette estimation est la limite supérieure de ce qui théoriquement pourrait être envoyé annuellement à La Hague pour retraitement ou entreposage de longue durée, et l'on constatera plus loin que la réalité des transports de combustibles irradiés est inférieure à ce que l'on peut estimer par la gestion du parc EDF. En intégrant les chiffres concernant les caractéristiques techniques d'exploitation et de transports pour les combustibles UOX et MOX, à ceux concernant la gestion du parc de réacteurs EDF, il est possible d'estimer le nombre d'emballages nécessaires au transport de l'ensemble des combustibles irradiés déchargés en 2001 et transportés à La Hague.

Enfin si l'on couple les données concernant les quantités de combustibles irradiés déchargés en 2001, avec les taux d'enrichissement initiaux et les taux de combustion de ces combustibles, il devient possible d'estimer les quantités de plutonium contenu dans les combustibles à destination de La Hague et d'estimer le flux global de plutonium vers les usines de retraitement. Ces estimations sont rassemblées dans le Tableau 5.

Tableau 4 Nombre de conteneurs nécessaires aux transports des combustibles irradiés déchargés du parc nucléaire d'EDF en 2001

Mode de gestion	Durée du cycle	Parc concerné	Réacteurs	Nombre d'assemblages et équivalent conteneurs
GARANÇE • UOX à 3,7 % par quart de cœur	12 mois	12 réacteurs 900 MWe	Gravelines 5, 6 Chinon B2 Blayais 3, 4 Fessenheim 1 Bugey 3, 5 Cruas 1, 2, 3, 4	UOX: 12x40=480 Ass. = 40 TN 12
GARANÇE MOX • UOX à 3,7 % par quart de cœur • MOX par tiers de cœur	12 mois	19 réacteurs 900 MWe	Blayais 1, 2 Chinon B1, B3, B4 Dampierre 1, 2, 3, 4 Gravelines 1, 2, 3, 4 St Laurent B1, B2 Tricastin 1, 2, 3, 4	UOX: 19x28=532 Ass. = 44 TN 12 MOX: 19x16=304 Ass. = 76 TN 12/2
CYCLADES • UOX à 4,2 % par tiers de cœur	18 mois	3 réacteurs 900 MWe	Fessenheim 2 Bugey 2, 4	UOX: 3x52/1,5=104 Ass. = 9 TN 12
GEMMES • UOX à 4 % par tiers de cœur	18 mois	20 réacteurs 1.300 MWe	Belleville 1, 2 Cattenom 1, 2, 3, 4 Flamanville 1, 2 Golfech 1, 2 Nogent 1, 2 Paluel 1, 2, 3, 4 Penly 1, 2 St Alban 1, 2	UOX: 20x64/1,5=853 Ass. = 122 TN 17
Standard N4 • UOX à 3,4 % par quart de cœur	12 mois	4 réacteurs 1.450 MWe	Chooz B1, B2 Civaux 1, 2	UOX: 4x52=208 Ass. = 30 TN 17
Total 58 réacteurs				93 TN 12 + 152 TN 17 = 245 conteneurs UOX 76 TN 12/2 = 76 conteneurs MOX = 321 conteneurs

Source : Estimations WISE-Paris d'après DSIN, Rapport annuel, 2001

Tableau 5 Quantités de plutonium théoriquement déchargées du parc nucléaire d'EDF en 2001

Type de gestion	Caractéristiques des combustibles	Quantités déchargées	Teneur en Pu	Quantités de Pu déchargées
GARANÇE 12 réacteurs 900 MWe	3,7 % d'U235 45,4 GWj/t	221,62 t	1,12 %	2,48 t
GARANÇE MOX 19 réacteurs 900 MWe	3,7 % d'U235 43 GWj/t	245,62 t	1,09 %	2,68 t
	6,65 % de Pu 38 GWj/t	140,36 t	5,02 %	7,06 t
CYCLADES 3 réacteurs 900 MWe	4,2 % d'U235 47,5 GWj/t	48,02 t	1,14 %	0,55 t
GEMMES 20 réacteurs 1.300 MWe	4 % d'U235 47,7 GWj/t	459,34 t	1,15 %	5,27 t
Standard N4 4 réacteurs 1.450 MWe	3,4 % d'U235 42 GWj/t	112,01 t	1,08 %	1,21 t
Total		1 227 t		19,25 t

Source : Estimations WISE-Paris, 2002²⁴

Tableau 6 Évolution du nombre de transports de combustibles irradiés

Année	Combustibles irradiés EDF (nombre d'emballages)	Combustibles irradiés étrangers (nombre d'emballages)	Total
1988	120	104	224
1989	143	134	277
1990	137	101	238
1991	98	113	211
1992	132	102	234
1993	179	108	287
1994	183	103	286
1995	153	85	238
1996	198	92	290
1997	208	89	297
1998	136	23	159
1999	156	9	165
2000	188	17	205
2001	146	45 ²⁵	191

Source : Autorités de sûreté, 1998, 2002 ; COGEMA,, 2001²⁶

²⁴ D'après EDF : Michel Debes, Délégation du combustible EDF, communication personnelle, 7 novembre 2002.

²⁵ D. Hertzog, Présentation des activités 2001 de COGEMA Logistics, Areva Technical Days, Paris, 27 juin 2002.

²⁶ Rapport commun des autorités compétentes de France, Allemagne, Suisse et Royaume Uni, *Surface contamination of nuclear spent fuel transports*, 24 octobre 1998 ; DGSNR, communication personnelle avec J. Aguilar, 1^{ère} sous-direction cycle du combustible, transport, 14 novembre 2002 ; COGEMA, www.cogemalahague.fr, « Retour des résidus vitrifiés de France en Allemagne », Annexe 2, 26 mars 2001.

Il est important de noter que les chiffres du Tableau 5 correspondent à l'hypothèse où tout le combustible irradié EDF déchargé est envoyé aux usines de retraitement de La Hague. Les chiffres sur l'évolution des quantités de combustibles EDF retraitées et entreposées à La Hague (voir Tableau 6) montrent que seulement 850 à 900 tonnes environ de combustibles UOX, c'est-à-dire à peu près les quantités retraitées chaque année, ainsi que 100 t de MOX sont actuellement envoyées en une année à La Hague.

Le transport de combustibles irradiés étrangers à destination de La Hague, activité qui représentait le transit de plus d'une centaine d'emballages par an dans le début des années 1990, était déjà en baisse avant 1998, date à laquelle ces transports ont été suspendus suite à l'affaire des transports contaminés. Cette baisse, amorcée en fait dès 1995, s'explique essentiellement par la baisse d'activité des usines de La Hague pour les clients étrangers. Si les transports de combustibles usés en provenance de Belgique, de Suisse et des Pays-Bas ont repris progressivement dès 1999, les transports des combustibles usés allemands n'ont pu reprendre qu'à partir du 31 janvier 2001, suite à l'accord Jospin-Schröder pour la reprise des transports sur une base bilatérale des flux de combustibles usés et de déchets vitrifiés.

Dans la pratique, le premier envoi de combustible irradié allemand n'a eu lieu qu'en avril 2001. Depuis cette date, on compte environ un convoi de combustibles irradiés allemands par mois, à raison de 4 emballages en moyenne. En dépit des attaques terroristes de septembre 2001 et du débat sur le risque du terrorisme nucléaire, 2002 est l'année de la reprise des transports de combustibles irradiés étrangers, et l'on a compté jusqu'à mi-décembre, 2 convois en provenance de la Suisse (2 emballages de 52 assemblages chacun), 6 en provenance des Pays Bas (6 emballages de 7 assemblages chacun) et 12 convois en provenance d'Allemagne (53 emballages pour au plus 516 assemblages)²⁷.

Une estimation simple montre que le flux des transports de combustibles irradiés étrangers, tel que stabilisé en 2002, devrait se monter à près de 20 convois pour 61 emballages. Les Pays Bas utilisent des TN 17/2 contenant 7 assemblages pour envoyer leurs combustibles irradiés, la Suisse des emballages TN 52L contenant 52 assemblages, et l'Allemagne a utilisé 24 emballages de type TN 17/2, 16 de type TN 13/2 à 12 assemblages et 13 de type TN 12/2 pour effectuer ses envois de combustible irradié en 2002.

COGEMA ne précise pas la nature des combustibles irradiés envoyés par ses clients étrangers, et il est envisageable que du MOX irradié allemand puisse être envoyé à La Hague. Cependant les chiffres COGEMA concernant l'entreposage de MOX irradié allemand à La Hague montrent qu'à priori aucun MOX irradié n'a été envoyé en 2002, le stock de 49 t n'ayant pas évolué entre fin février 2001 et fin septembre 2002. On considérera par conséquent pour l'estimation des flux de transports de combustibles étrangers, en conditions « normales », telles qu'en 2002, qu'aucun combustible MOX irradié allemand ne sera plus envoyé à La Hague.²⁸.

Le Tableau 7 propose, à partir d'une transposition des chiffres tirés de la gestion du parc de réacteurs à eau pressurisée français, le tonnage et le contenu en plutonium des transports de combustibles irradiés étrangers en France. On notera qu'en 2002 environ 87 % des transports étrangers provenaient d'Allemagne.

²⁷ D'après COGEMA, www.cogemalahague.fr, synthèse des bulletins hebdomadaires d'activité. Le chiffre du nombre d'assemblages pour l'Allemagne est estimé, COGEMA n'ayant pas toujours fourni d'indications précises sur les quantités transportées.

²⁸ Les contrats de retraitement allemands prévoient cependant que jusqu'à 10 % des combustibles irradiés importés d'Allemagne pourraient correspondre à du MOX irradié. Sur la base d'un dixième du tonnage des combustibles irradiés allemands importés annuellement, la répartition des 53 emballages transportés donne 24 TN 17/2 à 7 assemblages UOX, 18 TN 12/2 à 12 assemblages UOX et 11 TN 12/2 à 4 assemblages MOX.

Tableau 7 Transport de combustibles irradiés étrangers en France, nombre d'emballages et quantités de plutonium en 2002

	A llemagne	Suisse	Pays Bas	Total
Type de combustible	UOX	UOX	UOX	UOX
Transports (emballages)	53	2	6	61
Tonnage (tML)	251,1	19,1	19,4	289,6
Plutonium (tML)	2,8	0,2	0,2	3,2

Source : Estimations WISE-Paris, 2002²⁹

Le Tableau 8 résume les estimations de WISE-Paris sur les flux de combustibles irradiés, et leur contenu en plutonium, transportés annuellement vers La Hague. Ces estimations sont basées sur les flux de combustible irradié en provenance de l'étranger en 2002, et sur les hypothèses réalistes que d'une part 850 t d'UOX irradié et 100 t de MOX irradié sont envoyés à La Hague chaque année, et que d'autre part, afin de minimiser le nombre de transports à destination de La Hague, les combustibles UOX irradiés issus des réacteurs 900 d'EDF sont envoyés prioritairement.

Il est important de noter que le nombre d'emballages de transport transitant chaque année entre les réacteurs EDF et La Hague, ne reflète pas nécessairement le nombre de convois, ces derniers pouvant comporter un, deux voire trois emballages simultanément.

Tableau 8 Transport annuel de combustibles irradiés en France, nombre d'emballages et quantités de plutonium

	Tonnage (tML)	Transports (emballages)	Plutonium (tML)
Combustible EDF			
UOX irradié, réacteurs 900 MWe	515,3	93	5,71
UOX irradié, réacteurs 1.300/1.450 MWe	334,7	89	3,80
Total UOX irradié	850	182	9,51
MOX irradié	100	54	5,04
Total combustible EDF	950	236	14,55
Combustible étranger			
UOX irradié	289,6	61	3,2
Total combustible étranger	289,6	61	3,2
Total	1.239,6	297	17,75

Source : Estimations WISE-Paris, 2003

2.3. L'oxyde de plutonium

Le transport d'oxyde de plutonium est effectué entre les installations de retraitement (UP2 et UP3 à La Hague) et les usines de production de combustibles MOX (MELOX à Marcoule, ATPu à Cadarache, P0 à Dessel en Belgique). Le plutonium est acheminé exclusivement par route dans des conteneurs dédiés, les FS47. Chaque conteneur FS47 contient cinq boîtes métalliques empilées pouvant contenir chacune jusqu'à 3 kg de plutonium sous forme de poudre d'oxyde, et ils sont acheminés par dix conteneurs rangés dans une sorte de rack porté par un camion blindé.

²⁹ D'après COGEMA, www.cogemalahague.fr, *op. cit.* Le poids des assemblages combustibles suisses, de type BWR est de 183,3 kgML.

Un transport d'oxyde de plutonium correspond donc au plus à 150 kg de plutonium. Cependant les chiffres publics varient quant au contenu en plutonium d'un transport d'oxyde de plutonium, la fourchette allant de 12 à 15 kg par conteneur FS47, soit 120 à 150 kg par transport. Les estimations suivantes sur les nombres de conteneurs transportés sont basées sur le chiffre de 135 kg de plutonium en moyenne par transport afin de refléter la fourchette des chiffres publics, sachant par ailleurs qu'il semblerait qu'en moyenne les transports d'oxyde de plutonium contiennent systématiquement l'équivalent d'un FS47 vide pour des raisons de sûreté et/ou de sécurité.

Le Tableau 9 donne nos estimations du nombre de transports de plutonium sous forme oxyde, principalement en provenance de La Hague, à destination des installations de production de combustible MOX. Les données sont exprimées pour l'année 2001, en fonction des capacités de production de combustibles MOX des installations alimentées par le plutonium produit en France.

Tableau 9 Nombre de transports de poudre d'oxyde de plutonium en 2001

	ATPu (Cadarache)	MELOX (Marcoule)	P0 (Dessel)	Total
Capacité (tML/an)	40	101,3	40	181,3
Production MOX (tML)	39	97,4	37	173,4
Pu transporté (tML)	2,65	6,68	2,51	11,84
Nombre de transports	20	50	19	89

Source : Estimations WISE-Paris, 2002³⁰

2.4. Les combustibles MOX neufs

Après l'envoi des combustibles irradiés vers les usines de retraitement, et le transfert du plutonium séparé vers les usines de fabrication de combustible MOX, la troisième étape du transport de plutonium est celle de l'acheminement vers sa destination de la production de MOX³¹. Les transports de plutonium non irradié depuis les usines de fabrication de combustible MOX se divisent en deux catégories : la majeure partie concerne du combustible MOX effectivement destiné aux réacteurs, mais une fraction non négligeable consiste en transport des rebuts du processus de fabrication, qui sont retournés vers les usines de retraitement. Ces rebuts peuvent être sous forme de pastilles, crayonnées ou non, ou bien se trouver encore sous forme de poudre d'oxyde.

2.4.1. Le MOX à destination d'EDF et les rebuts français

Les assemblages de combustible MOX neufs sont transportés deux par deux au moyen du conteneur de transport dédié, le FS69. Chaque emballage mesure cinq mètres de long, pèse cinq tonnes et comporte un important blindage neutronique escamotable. Quatre de ces colis peuvent être transportés par route en un seul transport. Un transport de huit assemblages MOX contient alors autour de 245,6 kg de plutonium (à comparer avec les quelques 135 kg contenus dans un transport de poudre d'oxyde de plutonium). Le Tableau 10 présente l'estimation des quantités de combustible MOX transportées, basée sur les données de production de l'usine MELOX, qui opère actuellement pour un seul client, EDF.

Le calcul du nombre de transports de rebuts de fabrication, destinés à être entreposés sous eau dans les piscines de La Hague, peut se faire à partir d'une estimation d'écart entre le contenu en plutonium de la production 2001 de l'usine MELOX, à savoir du MOX enrichi en plutonium en moyenne à 6,65 % et les quantités de plutonium délivrées à l'usine dans le courant de cette même année. On considère donc que l'usine fonctionne en flux tendu et ne stocke pas d'oxyde de plutonium, ce qui semble relativement proche

³⁰ D'après DSIN, *Rapport annuel 2001*, et production 2000 de P0 (Dessel).

³¹ Toutefois, il convient de rappeler que le MOX non irradié est pratiquement équivalent sur le plan stratégique au plutonium séparé. Le plutonium peut en effet être séparé du combustible par voie chimique.

de la réalité, si l'on considère les 14 t de plutonium (MOX fabriqué compris) que MELOX est autorisée à stocker selon son décret de création³².

D'après les informations disponibles, les pastilles de MOX rebutées et non recyclées³³ sont censées être crayonnées et mises en assemblage puis transportées dans les conteneurs FS69 de la même manière que les assemblages MOX neufs non rebutés.

Cependant le dossier constitué par COGEMA dans le cadre de l'enquête publique³⁴ pour l'autorisation d'extension de la production de l'usine de 101 tML par an à 145 tML laisse entendre que les pastilles rebutées sont, comme les poudres rebutées, mises en vrac dans des sacs en plastiques eux mêmes placés dans les boîtes servant au transport de la poudre d'oxyde de plutonium à destination des usines de fabrication de MOX. Dans ce cas, la limitation en tonnage transporté provient de la capacité des boîtes métalliques contenues dans les FS47.

Pour les estimations des flux présentées dans le Tableau 10, on base le calcul sur l'hypothèse que le transport des pastilles rebutées de MOX neuf se fait au moyen de FS47 contenant chacun 135 kg au maximum de rebuts de MOX³⁵. Il est important de noter que si les rebuts de fabrication de MELOX étaient crayonnés puis assemblés comme l'installation le prévoyait initialement, le nombre de transports annuels de rebuts en provenance de MELOX, à destination de La Hague, passerait de l'ordre de grandeur estimé de 23 à un seul transport.

Tableau 10 Nombre de transports de MOX frais / rebuts de fabrication entre l'usine MELOX et les réacteurs EDF / les usines de La Hague en 2001

	Combustible frais	Rebuts de fabrication
Production de MOX (tML)	97,4	3,0
Contenu en plutonium (tML)	6,48	0,20
Nombre d'assemblages	211	équivalent à 7
Nombre de transports	27	23

Source : Estimations WISE-Paris, 2003³⁶

³² Décret n°99-664 du 30 juillet 1999 autorisant la Compagnie générale des matières nucléaires à créer une extension à l'installation nucléaire de base, dénommée Melox, sur la commune de Chusclan (département du Gard) et modifiant le décret du 21 mai 1990 autorisant la création de cette installation nucléaire de base, JO n°175 du 31 juillet 1999.

³³ L'usine MELOX possède un atelier dit de « rechamottage », permettant de réintroduire les pastilles de MOX ainsi que les mélanges d'oxyde rebutés, dans la chaîne de fabrication. Il semble cependant que le dimensionnement de cet atelier ne soit pas suffisant pour recycler l'ensemble des rebuts, l'excédent étant transporté à La Hague.

³⁴ COGEMA, « Demande d'extension de la capacité de production de l'usine MELOX », Dossier d'enquête publique, janvier 2003.

³⁵ Dans un échange de courriers électroniques avec WISE-Paris les 13 et 14 février 2002, M. Aguilar, Directeur, Sous-direction cycle du combustible et transports de la DGSNR, nous a indiqué – sans préciser si cette liste était exhaustive – que les rebuts MOX peuvent être transportés dans des colis du type FS47 (pastilles), FS41 (en étuis), et FS65 1.300 (crayons ou assemblages).

³⁶ Pour le plutonium transporté et le MOX fabriqué, d'après DSIN, *Rapport annuel 2001* ; pour les rebuts, calculs de WISE-Paris

2.4.2. Le MOX fabriqué pour les clients étrangers

Seule l'usine de fabrication de MOX de Cadarache, l'ATPu, fabrique du combustible au plutonium pour les clients étrangers, et plus précisément pour les seuls clients allemands. Les estimations de flux associés à cette production sont données dans le Tableau 11.

Pour des raisons techniques, l'ATPu, contrairement à MELOX, ne fabrique pas directement les assemblages destinés aux réacteurs. Le MOX fabriqué à Cadarache est envoyé à l'usine P0 à Dessel ou il est assemblé pour ensuite être envoyé aux électriciens allemands.

Nous n'avons pas trouvé d'informations sur le mode de transport du MOX fabriqué à Cadarache, ni même si les pastilles étaient préalablement insérées dans des crayons. Nous avons donc fait l'hypothèse, conservatrice pour le nombre de transports, que les modes de transports étaient comparables à ceux de MELOX pour le MOX frais. Il est possible que les transports soient en réalité plus nombreux.

Concernant les rebuts de fabrication, l'ATPu ne pratiquant pas le crayonnage de ces pastilles, le seul conteneur a priori adapté au transport de pastilles de MOX et de poudres rebutées semble être le FS47 servant au transport d'oxyde de plutonium. Cette possibilité est envisageable si l'on considère que COGEMA a la possibilité de réutiliser les FS47 arrivant à Cadarache après leur déchargement en plutonium, et que l'usine MELOX, plus moderne, utilise elle aussi ce procédé. L'utilisation de ce mode de transport pour le MOX neuf non rebuté paraît très peu probable car elle nécessiterait la mise en jeu de plusieurs centaines de conteneurs de type FS47.

Tableau 11 Nombre de transports de MOX frais / rebuts de fabrication allemands entre l'usine de fabrication ATPu (Cadarache) et l'usine P0 (Desse) / les usines de La Hague en 2001

	Combustible frais	Rebuts de fabrication
Production de MOX (tML)	39	0,85
Contenu en plutonium (tML)	2,59	0,06
Nombre d'assemblages	85	équivalent à 2
Nombre de transports	11	7

Source : Estimations WISE-Paris, 2003³⁷

2.4.3. Les importations et l'entreposage de MOX frais étranger

Concernant l'importation de MOX frais, sous forme de rebuts de fabrication étrangers, nous ne donnerons pas de chiffres annuels, cette activité pouvant être qualifiée d'exotique et donc relativement irrégulière. Les seuls transports de rebuts de fabrication de MOX importés connus³⁸ correspondent à des importations en provenance de l'usine de fabrication de MOX de Hanau, dont le démantèlement comprend la vidange du plutonium encore contenu dans l'usine après sa mise à l'arrêt en 1991.

Pour ce faire, il a été choisi de fabriquer volontairement du MOX hors critères de contrôle-qualité (donc impropre à la consommation en réacteur), qui serait envoyé pour entreposage dans les piscines de La Hague. La liste des licences de transport délivrées par l'Agence fédérale allemande de radioprotection (Bundesamt für Strahlenschutz, BfS)³⁹ concernant le transport de ce MOX spécifique, couplée aux chiffres de COGEMA sur la situation de l'entreposage du MOX frais allemand dans ses piscines, entre fin février 2001 et fin décembre 2001, indique que les assemblages de mauvais MOX sont transportés par deux, chaque convoi comportant un emballage contenant une tonne de MOX d'Hanau. Au

³⁷ Base d'estimation identique à celle proposée pour MELOX.

³⁸ Cette activité a littéralement été découverte en 2001 alors qu'elle avait lieu depuis au moins 1997. Voir le briefing de WISE-Paris, *Transports secrets et stockage illégal – L'étrange histoire des déchets importés à La Hague*, 6 mars 2001. http://www.wise-paris.org/francais/nosbreves/annee_2000/nosbreves000719.html

³⁹ Bundesamt für Strahlenschutz, licences de transport, 20 décembre 2002. <http://www.bfs.de/gv/transpg/tg.pdf>

31 décembre 2001, COGEMA déclarait stocker 11 t de MOX frais allemand, ce qui correspond à près de 11 transports en provenance de Hanau. La vidange totale de l'installation de Hanau devrait entraîner l'importation d'environ 15 t de rebuts de MOX au total, ce qui représenterait encore 4 t (ou de l'ordre de quatre convois) à transférer. En 2002, l'Agence fédérale a délivré cinq licences de transports pour du mauvais MOX, ce qui pourrait signifier que la vidange de l'usine de Hanau est en voie d'achèvement.

Outre ces rebuts de MOX importés, le site de La Hague entrepose des rebuts issus des usines de fabrication de MOX de COGEMA dont une part correspond aux rebuts de production des combustibles MOX pour les clients étrangers. Les principaux sont l'ensemble des rebuts issus de l'ATPu depuis que cette usine consacre sa production aux clients allemands, et les assemblages fabriqués à MELOX pour l'électricien japonais KEPCO, qui a suspendu en décembre 2001 son contrat avec COGEMA et refusé de prendre possession de ces combustibles⁴⁰. Il est également probable que soient entreposés à La Hague des rebuts provenant de l'usine de fabrication de MOX de Dessel. L'ensemble des matériaux concernés, dont le retraitement ne semble pas prévu, ne font pas non plus l'objet d'un programme de retour, lequel engendrerait un nombre important de transports supplémentaires vers les pays concernés.

2.5. Bilan des transports de plutonium en France

À l'issue de cette évaluation des volumes et du nombre des transports entre les différentes étapes de la chaîne du plutonium, il est possible de dresser un bilan global des transports de plutonium en France. Ce bilan est présenté dans les tableaux et figures des pages suivantes. Bien que la méthode retenue, développée ci-dessus, aboutisse à des chiffres très précis, il faut garder à l'esprit que les estimations proposées doivent plutôt être considérées comme une approche, certes exhaustive, des ordres de grandeur et ceci pour deux raisons principales :

- les estimations sont tributaires de l'accès aux informations les plus précises sur les quantités mises en jeu dans les pratiques industrielles ; si une partie de ces données est publique, sur de nombreux points, l'absence d'information a dû être palliée par des hypothèses jugées réalistes ;

- la chaîne du plutonium n'est jamais à l'équilibre ; les flux de matières ne sont pas constants, et ne sont pas déterminés sur une base annuelle. Les estimations proposées mêlent d'ailleurs des informations correspondant aux années 2001 et 2002 ; elles ne reflètent pas le bilan réel d'une année donnée mais le bilan « type » d'une période d'un an dans les conditions actuelles.

Les Tableaux 12 à 16 présentent le bilan des estimations WISE-Paris par catégorie et en distinguant la part d'EDF de celle des contrats étrangers. Il dresse d'abord le tableau technique des transports en quantité totale de matières nucléaires impliquées, en nombres d'emballages (considérés comme l'« unité » de transport) et en tonnage de plutonium contenu. Ce bilan est ensuite, pour mieux rendre compte du risque associé, rapporté au nombre de kilomètres sur lesquels les emballages, ou les quantités de plutonium sont transportés (voir les distances⁴¹ entre les différents sites en Annexe 2). Les Figures 3 et 4 offrent une synthèse des tableaux précédents.

⁴⁰ L'autorité de sûreté nucléaire, dans une lettre de suite d'inspection de la DRIRE Basse-Normandie au Directeur de l'établissement COGEMA de La Hague, du 12 août 2002, mentionne ainsi que « un lot de PuO₂ Kansai (10 colis FS47) est revenu de l'usine MELOX, en mars 2002, en raison d'une qualité de produit inadéquate ».

⁴¹ Il convient de noter que les distances prises en compte sont des estimations de distances « à vol d'oiseau », évidemment inférieures aux distances réellement parcourues par les transports routiers ou ferroviaires. L'ensemble des évaluations de distances proposé dans cette partie est donc une estimation par la borne inférieure des distances réelles de transport de plutonium.

Tableau 12 Estimation des tonnages de matières nucléaires transportés en France en une année pour les transports contenant du plutonium (en tML U et/ou Pu)

	EDF	Étranger	Total
Combustibles irradiés	950	289,6	1.239,6
Combustibles UOX irradiés	850	289,6	1.139,6
Combustibles MOX irradiés	100	–	100,0
Poudre d'oxyde de plutonium	6,68	5,16	11,8
Produits de fabrication de MOX	100,4	39,9	140,3
Combustibles MOX neufs	97,4	39	136,4
Rebuts de fabrication MOX	3,0	0,9	3,9
Total	1.057,1	334,6	1.391,7

Source : Estimations WISE-Paris, 2003

Tableau 13 Estimation du nombre d'emballages véhiculés en France en une année pour les transports contenant du plutonium (en nombre d'emballages)

	EDF	Étranger	Total
Combustibles irradiés	(248)^a 297	61	297
Combustibles UOX irradiés	182	61	243
Combustibles MOX irradiés	54	–	54
Poudre d'oxyde de plutonium	50	39	(117) 89
Produits de fabrication de MOX	(52) 50	18	68
Combustibles MOX neufs	27	11	38
Rebuts de fabrication MOX	23	7	30
Total	336	118	(439) 454

^a Les chiffres entre parenthèses indiquent, pour les catégories correspondantes, les projections pour l'année 2000 estimées par WISE-Paris dans la première version, publiée en 1995, de cette étude.

Source : Estimations WISE-Paris, 2003

Tableau 14 Estimation des tonnes de plutonium véhiculées en France en une année pour les transports contenant du plutonium (en tPu)

	EDF	Étranger	Total
Combustibles irradiés	14,55	3,22	17,77
Combustibles UOX irradiés	9,51	3,22	12,73
Combustibles MOX irradiés	5,04	–	5,04
Poudre d'oxyde de plutonium	6,68	5,16	11,84
Produits de fabrication de MOX	6,68	2,65	9,33
Combustibles MOX neufs	6,48	2,59	9,07
Rebuts de fabrication MOX	0,20	0,06	0,26
Total	27,91	11,03	38,94

Source : Estimations WISE-Paris, 2003

Tableau 15 Estimation du nombre d'« emballages.kilomètres »^a parcourus en France en une année par les transports contenant du plutonium (en emballage.millier km)

	EDF (Rail / Route)	Étranger (Rail / Route)	Total (Rail / Route)
Combustibles irradiés	111,6 (104,5 / 7,1)	35,8 (34,0 / 1,8)	147,5 (138,5 / 8,9)
Combustibles UOX irradiés	87,0 (81,6 / 5,5)	35,8 (34,0 / 1,8)	122,8 (115,6 / 7,3)
Combustibles MOX irradiés	24,6 (23,0 / 1,6)	–	24,6 (23,0 / 1,6)
Poudre d'oxyde de plutonium	40,0 (– / 40,0)	24,1 (– / 24,1)	64,1 (– / 64,1)
Produits de fabrication de MOX	30,1 (– / 30,1)	13,0 (– / 13,0)	43,1 (– / 43,1)
Combustibles MOX neufs	11,7 (– / 11,7)	6,8 (– / 6,8)	18,5 (– / 18,5)
Rebuts de fabrication MOX	18,4 (– / 18,4)	6,2 (– / 6,2)	24,6 (– / 24,6)
Total	181,7 (104,5 / 77,1)	72,9 (34,0 / 38,9)	254,6 (138,5 / 116,1)

^a Un « emballage.kilomètre » correspond au transport d'un emballage contenant du plutonium sur un kilomètre. Dans cette unité, le transport d'un emballage sur 1.000 kilomètres est équivalent, par exemple, au transport de 100 emballages différents sur 10 kilomètres chacun.

Source : Estimations WISE-Paris, 2003

Tableau 16 Estimation du nombre de « tonnes de plutonium.kilomètres »^a parcourus en France en une année par les transports contenant du plutonium (en tPu.km)

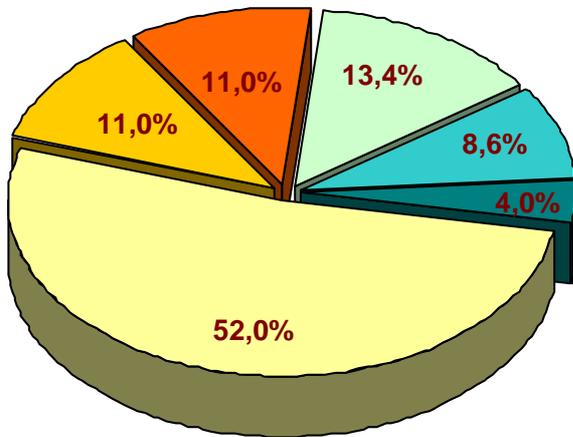
	EDF (Rail / Route)	Étranger (Rail / Route)	Total (Rail / Route)
Combustibles irradiés	6.953 (6.517 / 437)	1.926 (1.829 / 97)	8.879 (8.346 / 533)
Combustibles UOX irradiés	4.656 (4.371 / 285)	1.926 (1.829 / 97)	6.582 (6.200 / 382)
Combustibles MOX irradiés	2.297 (2.146 / 151)	–	2.297 (2.146 / 151)
Poudre d'oxyde de plutonium	5.337 (– / 5.337)	3.194 (– / 3.194)	8.532 (– / 8.532)
Produits de fabrication de MOX	2.970 (– / 2.970)	1.647 (– / 1.647)	4.617 (– / 4.617)
Combustibles MOX neufs	2.810 (– / 2.810)	1.594 (– / 1.594)	4.404 (– / 4.404)
Rebuts de fabrication MOX	160 (– / 160)	53 (– / 53)	213 (– / 213)
Total	15.260 (6.517 / 8.744)	6.767 (1.829 / 4.938)	22.027 (8.346 / 13.682)

^a Une « tonne de plutonium.kilomètre », ou tPu.km correspond au transport d'une tonne de plutonium sur un kilomètre, équivalent par exemple au transport d'un kilogramme de plutonium sur 1.000 kilomètres.

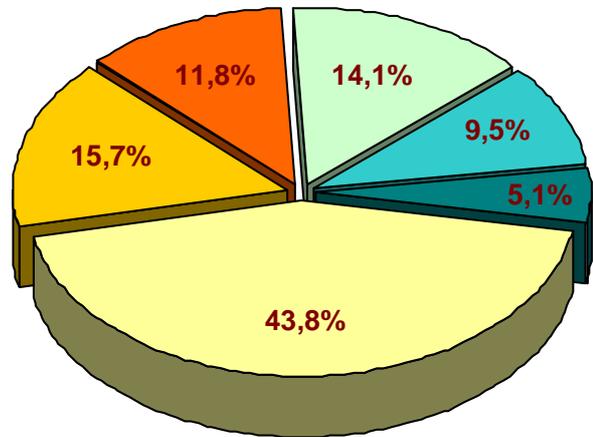
Source : Estimations WISE-Paris, 2003

Figure 3 Bilan des transports contenant du plutonium pour une année en France en nombre d'emballages et en « emballage.kilomètres »

Répartition par catégorie de transport en nombre d'emballages



Répartition par catégorie de transport en « emballage.kilomètres »



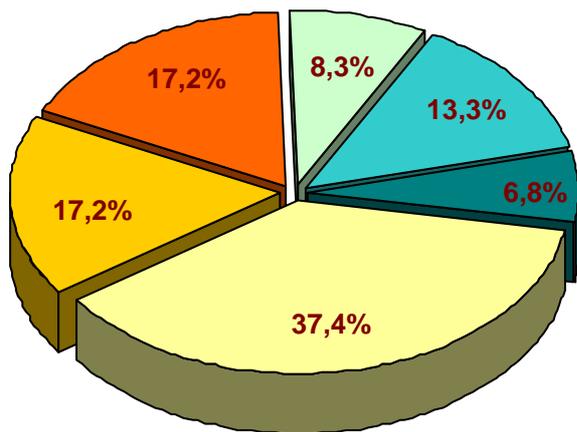
- Combustibles irradiés EDF
- Oxyde de plutonium pour MOX EDF
- Produits de fabrication MOX EDF

- Combustibles irradiés étrangers
- Oxyde de plutonium pour MOX étranger
- Produits de fabrication MOX étrangers

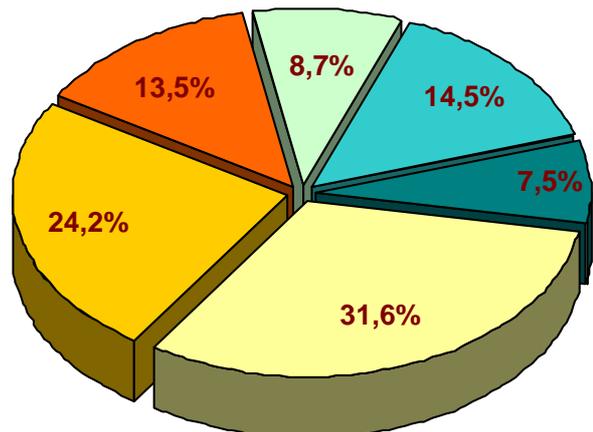
Source : Estimations WISE-Paris, 2003

Figure 4 Bilan des transports contenant du plutonium pour une année en France en tonnes de plutonium et en « tonne de plutonium.kilomètres »

Répartition par catégorie de transport en tonnes de plutonium



Répartition par catégorie de transport en « tonne de plutonium.kilomètres »



- Combustibles irradiés EDF
- Oxyde de plutonium pour MOX EDF
- Produits de fabrication MOX EDF

- Combustibles irradiés étrangers
- Oxyde de plutonium pour MOX étranger
- Produits de fabrication MOX étrangers

Source : Estimations WISE-Paris, 2003

2.5. Conclusions sur les flux de matières

Le bilan exhaustif des transports de plutonium liés à la chaîne du combustible nucléaire en France témoigne de l'ampleur d'une activité à haut risque engendrée par l'industrie du plutonium. Bien que l'absence d'informations détaillées sur certaines étapes de la chaîne empêche d'établir une comptabilité précise des transports, une évaluation réaliste des flux permet de fixer les ordres de grandeur.

Selon nos estimations, plus de 450 transports⁴² de matériaux contenant au total près de 40 tonnes de plutonium circulent en France pendant une année. La moitié seulement de ces emballages (52 %) et un gros tiers des quantités de plutonium (37 %) sont attribuables aux transports de combustibles irradiés français.

Si l'on peut considérer La Hague comme site centralisé d'entreposage de combustibles irradiés – bien qu'il serait parfaitement possible d'entreposer les combustibles irradiés sur les sites des centrales nucléaires (option prise dans la plupart des pays nucléaires et nouvelle stratégie allemande) –, l'industrie du plutonium est donc responsable d'une multiplication par deux du nombre des transports de matières au plutonium, et par 2,5 des quantités de plutonium transportées sur le territoire français.

Cette augmentation est imputable pour moitié environ aux transports supplémentaires engendrés par le retraitement et la réutilisation du plutonium du combustible d'EDF, qui représentent respectivement 22 % et 34 % du nombre de transport et des quantités de plutonium transportées.

L'autre moitié de l'augmentation est due à l'ensemble des contrats passés par l'industrie du plutonium française avec des clients étrangers. Les importations de matières envoyées au site de retraitement de La Hague, les transferts nécessaires entre les usines de retraitement et de fabrication de MOX, et les retours d'une partie des matières vers les pays d'origine représentent 26 % du nombre total de transports et 28 % des quantités de plutonium qui circulent. Au total, les services aux clients étrangers impliquent pour la France le transit sur son territoire d'environ 120 transports par an, contenant plus de 10 tonnes de plutonium. Il faut noter que ces transports devraient être encore plus nombreux si l'équilibre était rétabli entre les flux d'entrée et de sortie du plutonium étranger en France.

L'accroissement du risque induit pour la population française peut se mesurer en rapportant les transports aux distances parcourues. En distance cumulée, ce sont plus de 250.000 kilomètres qui sont parcourus chaque année en France, sur route ou sur rail, par des emballages de transports contenant du plutonium dans le cadre de la chaîne du combustible. Sur ce total, près des trois cinquièmes, soit 140.000 kilomètres, sont parcourus, en proportion égale, par des transports liés à la réutilisation du plutonium français d'une part, et aux services aux électriciens étrangers de l'industrie du plutonium d'autre part.

Si l'on rapporte les quantités de plutonium transportées aux distances, l'activité de transport de matériaux contenant du plutonium atteint 22.000 « tonnes de plutonium.kilomètres » (tPu.km). Ceci équivaut au transport de 22 kg de plutonium – une quantité suffisante pour fabriquer une bombe – sur un million de kilomètres à travers le territoire français.

Bien qu'un plus grand nombre d'emballages soient transportés par la route que par voie ferroviaire, le rail représente la majorité des distances parcourues, soit l'équivalent cumulé de 138.000 kilomètres contre 116.000 à la route. Si l'on tient compte des quantités transportées, toutefois, la proportion s'inverse nettement, avec 13.500 tPu.km par route et 8.500 tPu.km par rail.

La répartition est relativement inégale entre les trois principales catégories de produits transportés. Les combustibles irradiés représentent la majeure partie des transports (près de 300 emballages sur 450). Mais les transports de plutonium entre l'usine de retraitement et les usines de fabrication de MOX, sous forme de poudre d'oxyde, représentent presque un tiers des quantités de plutonium transportées. Du fait de l'éloignement entre ces usines, les transports de poudre d'oxyde de plutonium représentent 8.500 tPu.km – autant que les transports de combustibles irradiés – soit l'équivalent du transport sur un million de kilomètres de 8,5 kg d'oxyde de plutonium sous forme de poudre (davantage que la « quantité

⁴² On appelle ici « transport » le trajet d'un emballage de combustible irradié, de poudre d'oxyde de plutonium ou de produit de fabrication de MOX non irradié, correspondant au chargement d'un wagon ou d'un camion.

significative »⁴³ correspondant à la quantité minimale nécessaire pour la fabrication d'une bombe atomique).

Les produits de fabrication des usines de MOX, combustibles neufs et rebuts, représentent sur tous les plans – quantités et distances – la part la moins importante. Toutefois les rebuts MOX, bien que 30 fois moins importants en quantité de plutonium que les combustibles MOX neufs, représentent presque autant d'emballages et parcourent davantage de distance. Ils pèsent moins de 1 % dans les quantités transportées mais contribuent pour près de 10 % à la distance cumulée du total des transports de plutonium.

⁴³ L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) définit la « quantité significative » (ou *significant quantity, SQ*) comme « la quantité approximative de matières nucléaires pour laquelle, en tenant compte de tout processus de conversion nécessaire, la possibilité de fabrication d'un engin explosif nucléaire ne peut pas être écartée » (traduction de l'anglais par WISE-Paris)

3. Les risques associés aux transports de plutonium

Le plutonium est un élément chimique parmi les plus dangereux qui soient, de par ses propriétés fissiles et sa très grande radiotoxicité. La multiplication des transports de plutonium sur le territoire qu'implique la filière du retraitement est donc, du point de vue des risques associés, un phénomène majeur qu'il convient d'évaluer sérieusement, en fonction de la nature des matériaux transportés et des conditions pratiques de transport.

Il existe plusieurs niveaux de risques liés au transport des matières nucléaires contenant du plutonium, à commencer par les problèmes posés dans le cadre d'une exploitation normale. Les statistiques sur les transports de matières dangereuses montrant que les accidents ne sont pas rares, l'évaluation des dangers en situation accidentelle des transports de plutonium est également très importante. Enfin, après le 11 septembre 2001, la possibilité d'actes de malveillance visant les transports de plutonium doit être sérieusement envisagée. Il est indispensable de s'interroger sur l'impact direct d'une action potentielle dirigée contre un de ces transports. Le problème de sécurité des transports de plutonium inclut aussi le risque de diversion des matières, soit pour approvisionner un programme d'armement nucléaire clandestin, soit plus simplement pour les utiliser, avec un engin explosif classique, dans le cadre d'une « bombe sale ».

3.1. Les caractéristiques du plutonium

Les problèmes de sûreté dus à l'utilisation du plutonium en quantités industrielles sont multiples. Ils varient suivant la forme physique, ainsi que suivant la composition isotopique du plutonium. Comme tous les métaux lourds, le plutonium est un toxique chimique⁴⁴. Ses isotopes sont radioactifs (émetteurs bêta/gamma et émetteurs alpha), et deux de ses isotopes principaux sont fissiles (plutonium-239 et 241). C'est pour ses caractéristiques de fission qu'il est d'ailleurs utilisé dans le combustible MOX, en remplacement de l'isotope fissile de l'uranium (uranium-235).

En application du règlement de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) qui édicte des recommandations en matière de transport, la sûreté des transports est basée sur la sûreté des conteneurs de transport, c'est-à-dire sur des caractéristiques d'emballage telles que le confinement des matières nucléaires soit assuré dans des conditions normales et accidentelles de transport préalablement définies. Les conteneurs sont conçus d'une part afin que les expositions radiologiques des travailleurs et des populations durant des conditions normales de transport soient inférieures aux limites réglementaires, et d'autre part afin qu'ils résistent à certaines situations accidentelles critiques (voir Annexe 5).

3.1.1. Les problèmes de criticité

La concentration d'une quantité suffisante de plutonium (ou d'une autre matière fissile) peut induire un risque de criticité, c'est-à-dire de déclenchement en chaîne de réactions incontrôlées de fission. La constitution d'une masse critique est à la base de la réaction nucléaire dans les bombes atomiques, et de la réaction dans les réacteurs nucléaires : lorsqu'un neutron rencontre un noyau de plutonium 239 ou un autre noyau fissile, une réaction se produit (la fission) qui casse le noyau en deux (les produits de fission) tout en émettant des rayons gamma et selon les cas deux ou trois neutrons. Ces neutrons peuvent être à l'origine de nouvelles réactions de fission avec de nouveaux noyaux fissiles s'ils ne sont pas ralentis ou absorbés ; c'est le cas dans un réacteur nucléaire.

⁴⁴ Le plutonium est potentiellement producteur de radicaux oxydants. Voir M. Masse (CEA/DSV/DPTE), « Plutonium, radio toxicité et radioprotection », conférence de la SFEN, *Le plutonium, un nouveau combustible*, Paris, 9 juin 1994..

Le seuil de criticité est la masse de matière fissile, en l'occurrence de plutonium, pour différentes combinaisons géométriques, à partir de laquelle une réaction nucléaire en chaîne est possible. La forme géométrique sous laquelle se présente la matière est primordiale dans les phénomènes de criticité. Le milieu environnant la matière est également important.⁴⁵ Il semble qu'une masse minimale de plutonium-239 de 500 g soit suffisante pour permettre, sous certaines conditions, de déclencher une réaction de criticité⁴⁶.

Cette réaction nucléaire en chaîne émet d'importantes quantités de chaleur et de rayonnements gamma et neutroniques. De 1953 à 2001, l'IPSN⁴⁷ a recensé quelques 57 accidents de criticité dans le monde dont 36 dans des réacteurs et des laboratoires de recherche et 21 dans des installations du cycle du combustible. Sur les 17 décès enregistrés et plus de 130 personnes irradiées suite à ces accidents, environ 3 décès et 44 irradiations plus ou moins sévères sont dus à 12 accidents de criticité ayant mis en jeu des quantités de plutonium allant de moins d'un gramme à plus de 15 kg.

3.1.2. Les problèmes de radioprotection

Les matières radioactives sont des matières rayonnant de l'énergie. Suivant les effets radiologiques de ces rayonnements, c'est-à-dire la nature de leur effet sur l'organisme, ces rayonnements sont différenciés en trois types : les rayonnements alpha, les rayonnements bêta/gamma, et les rayonnements neutroniques. Les rayonnements les plus nocifs sont les rayonnements alpha et neutroniques. Une caractéristique importante des rayonnements alpha est qu'ils sont pratiquement arrêtés par un « blindage » aussi faible qu'une feuille de papier. En principe, les rayonnements des matières radioactives transportées et confinées dans les conteneurs de transport qui restent mesurables à l'extérieur du conteneur ne comportent donc pas de rayonnement alpha. Le danger principal d'une matière radioactive alpha est qu'elle soit incorporée dans le corps humain (par ingestion ou inhalation) et délivre directement son rayonnement sur les organes humains. Par contre, les rayonnements bêta/gamma sont difficilement arrêtés par des blindages épais et peuvent être la cause de l'irradiation des travailleurs et des populations durant les conditions normales de transport.

La radioactivité des matières nucléaires est mesurée en désintégrations par seconde (becquerels, Bq) et chaque isotope est caractérisé par un type de désintégration (alpha, bêta, gamma, neutrons) et par sa période radioactive (appelée aussi sa demi-vie car elle désigne le temps au bout duquel la moitié de la matière s'est désintégrée). L'Annexe 6 présente les périodes radioactives et les modes de désintégration des différents isotopes du plutonium. Il faut remarquer que le plutonium-241 se désintègre par émission bêta avec une période de 15 ans en américium-241, qui lui-même est émetteur alpha de période 460 ans. La proportion de plutonium-241 dans le plutonium augmente avec le taux d'irradiation des combustibles en réacteur, et est encore plus importante dans le plutonium du combustible MOX irradié. La proportion croissante d'américium accroît la radiotoxicité du plutonium auquel il est mélangé, complique sa manutention et son utilisation.

3.1.3. Le plutonium et la prolifération

Une des questions les plus importantes concernant le plutonium est la justification des nuances entre plutonium dit militaire et plutonium dit civil, et du statut de l'industrie civile du plutonium en matière de prolifération nucléaire. Avec l'industrialisation de l'utilisation du plutonium dans des programmes civils, des quantités très importantes de cet élément non naturel ont été produites. En France, les premières

⁴⁵ Le pouvoir « modérateur » du milieu environnant est très important. La masse critique (avec de l'eau comme milieu extérieur) du plutonium sous forme oxyde est de 920 grammes, alors qu'elle est de plusieurs centaines de kilogrammes en l'absence d'hydrogène. Sur le premier point, voir : COGEMA-La Hague, *Les techniques du retraitement*, mars 1992 ; sur le second point : « Le risque de criticité dans les installations du cycle du combustible », *Bulletin de la Sécurité Nucléaire*, novembre 1991.

La forme géométrique sous laquelle se présente la matière est primordiale : accroître le rapport surface/volume diminue les risques de criticité (en augmentant la fuite vers l'extérieur des neutrons). C'est pourquoi l'oxyde de plutonium placé dans son conteneur de transport est sous la forme d'un cylindre étroit et long.

⁴⁶ IPSN, *Les accidents de criticité dans l'industrie nucléaire*, mise à jour novembre 2001.

⁴⁷ IPSN, *op. cit.*

installations de production de plutonium ont alimenté le programme militaire de fabrication de bombes atomiques ainsi que le programme nucléaire civil. La production de plutonium pour ces deux programmes utilise le même type de technologie.

Le plutonium utilisé par les militaires et le plutonium utilisé dans la fabrication de combustibles MOX à l'heure actuelle se différencient physiquement par leur composition isotopique, c'est-à-dire la proportion des différents isotopes de plutonium dans le mélange. Cette différence est due au taux de combustion des combustibles irradiés dont provient le plutonium : le combustible graphite/gaz et les éléments dits de « couverture fertile » du surgénérateur Phénix qui ont alimenté en plutonium le programme militaire. Leur taux d'irradiation était très bas, inférieur d'un facteur 20 à 40 à celui du combustible standard à l'oxyde d'uranium des combustibles des réacteurs standard actuels. Le plutonium utilisé pour la production de bombes contient ainsi une proportion importante de plutonium-239, principal isotope fissile du plutonium de qualité militaire. Le plutonium des combustibles irradiés standard contient lui une proportion plus importante de l'autre isotope fissile du plutonium, le plutonium-241, et donc à terme d'américium-241. Le plutonium utilisé par les militaires est donc moins radioactif que le plutonium des programmes « civils » pour les combustibles MOX.

Selon l'industriel du retraitement, COGEMA, « pour fabriquer une bombe atomique au plutonium, il faut du plutonium très pur qui possède une fraction élevée d'isotopes dits fissiles ». ⁴⁸ Au contraire, le directeur général de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), l'organisme international de contrôle des installations nucléaires en matière de prolifération nucléaire, se base sur un tout autre avis : « l'Agence considère le plutonium provenant de combustible irradié à de forts taux de combustion et en général le plutonium d'une quelconque composition isotopique à l'exception du plutonium contenant plus de 80 % de plutonium-238, comme utilisable pour un dispositif explosif nucléaire » ⁴⁹. La proportion de plutonium-238 dans le plutonium d'un combustible standard à l'oxyde d'uranium est de l'ordre de 2 %, et dans le plutonium d'un combustible MOX irradié de l'ordre de 3 %. EDF développe une position plus nuancée que la COGEMA : les propriétés neutroniques moins bonnes du plutonium produit dans les réacteurs civils rendent son utilisation militaire « moins facilement réalisable » ⁵⁰.

Un mémorandum du Département d'Etat des Etats-Unis d'Amérique de 1974 à destination de ses ambassades précise de manière plus technique la question. Selon ce document, la radioactivité accrue du plutonium des réacteurs standard ne rend son utilisation militaire que légèrement plus difficile. La manutention du plutonium d'une quelconque composition isotopique est toujours difficile. De plus, même des bombes élaborées en employant des technologies avancées, à partir de plutonium provenant de réacteurs standard, produiront des explosions nucléaires importantes ⁵¹.

Cette question est donc techniquement tranchée. Il faut bien considérer que le plutonium sortant des usines de La Hague et servant dans la fabrication de combustible MOX est utilisable pour la fabrication d'engins nucléaires explosifs. Toute indication visant à banaliser l'utilisation du plutonium procède d'une dangereuse désinformation.

Mais l'élaboration d'une bombe nucléaire nécessite la mise en œuvre de technologies plus avancées que pour la fabrication d'un engin explosif. Depuis l'attaque terroriste du 11 septembre 2001, la crainte de voir des engins appelés « bombes sales » a prédominé sur la crainte de voir des groupes terroristes posséder la bombe atomique. De facture plus rudimentaire, les « bombes sales » ne font pas intervenir de réaction de fission en chaîne, mais associent simplement une charge explosive de forte puissance avec un composé radioactif sous une forme hautement dispersable. La forte détonation et le souffle qui s'ensuit suffisent à disperser le composé radioactif sur de grandes surfaces, entraînant une contamination des zones couvertes par la dispersion, c'est pourquoi la forme du composé radioactif doit pouvoir permettre une dispersion maximum. C'est le cas du plutonium extrait des combustibles irradiés retraités à La Hague. Ce plutonium

⁴⁸ COGEMA, *Non prolifération : le point de vue de l'industriel*, document distribué à la Conférence de presse COGEMA du 14 avril 1994.

⁴⁹ Lettre de Hans Blix, Directeur de l'AIEA, à Paul Leventhal, président du Nuclear Control Institute, Washington D.C., Etats-Unis, datée du 1er novembre 1990.

⁵⁰ EDF, Direction Production Transport, *Recyclage du plutonium dans les centrales REP d'EDF*, mai 1994.

⁵¹ U.S. Department of State, State Airgram 5677, 27 novembre 1974.

se retrouve sous forme de dioxyde (PuO₂) en poudre hautement dispersable et possède donc un grand intérêt pour d'éventuels groupes terroristes souhaitant mettre au point une « bombe sale ».

3.2. Les effets radiologiques en conditions normales de transport

En conditions normales de transport, les matières radioactives de l'industrie nucléaire sont sources de doses radiologiques reçues par les employés, et par le public à proximité. Un organisme international, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), a édicté des recommandations en matière de radioprotection qui sont en principe appliquées en France et dans la majorité des pays. La CIPR a aussi recommandé des doses radiologiques maximales réglementairement acceptables par pratique pour le public et pour les employés du nucléaire. Une première transposition européenne de la recommandation générale de la CIPR dite CIPR60 a été faite le 13 mai 1996 sous le nom de directive Euratom 96/29. En France, ces réglementations ont été transposées en droit français et appliquées par directive depuis le 8 mars 2001 seulement. Les doses maximales réglementaires pour cette pratique sont aujourd'hui de 5 mSv par an pour les employés du nucléaire, et de 1 mSv par an pour le public. On considérera cependant ces limites comme une protection minimum⁵².

3.2.1. Les doses radiologiques induites par les matières contenant du plutonium

Afin de comparer les caractéristiques radiologiques de matériaux contenant du plutonium, le tableau suivant montre les doses à proximité de l'oxyde de plutonium et des combustibles MOX frais. Il peut être remarqué que la composition isotopique du plutonium (qui varie notamment avec le temps depuis la séparation de l'américium) n'a pas d'influence notable sur les doses reçues à la surface des emballages blindés, et que l'oxyde de plutonium est plus radioactif que le MOX frais.

Tableau 17 Débit de dose d'irradiation à proximité de l'oxyde de plutonium et des éléments combustibles MOX^a en mSv/h.

	Oxyde de plutonium		Assemblages MOX pour REP 900 MWe	
	200	600	200	600
<i>Temps depuis la séparation de l'américium (jours)</i>				
Dose en surface, sans blindage	60	180	0,5	0,8
Dose en surface, avec blindage de 5 mm	0,15	0,15	0,03	0,03

^a Le débit de dose est donné pour un combustible MOX contenant 4,3 % en masse de plutonium, un chiffre inférieur aux niveaux atteints actuellement ; les débits sont augmentés pour des combustibles MOX plus récents.

Source : Belgonucléaire, 1984⁵³

3.2.2. Les doses radiologiques dues aux transports

Les doses induites à proximité des convois de transport de matières nucléaires sont liées au débit neutronique que l'on peut mesurer sur les surfaces accessibles des transports de matières nucléaires, à savoir les surfaces externes des véhicules de transport (wagons et camions) et des colis mais aussi les surfaces internes des véhicules. Les règles édictées par l'AIEA concernant les débits neutroniques de

⁵² La discussion des recommandations de la CIPR dépasserait largement le cadre de cette étude. Signalons simplement que les limites recommandées par la CIPR ont été critiquées par des scientifiques de grande réputation (tels que Prof. John Gofman, Dr. Alice Stewart, Dr. Rosalie Bertell, Dr. Patrick Green) comme largement insuffisantes.

⁵³ Bairiot, H., « Laying the foundations for plutonium recycle in light water reactors », Belgonucléaire, dans *Nuclear Engineering International*, janvier 1984.

surface des transports indiquent que le taux de radiation mesuré sur une surface moyenne d'au minimum 300 cm², ne doit pas dépasser 4 Bq/cm² pour les émetteurs bêta, gamma et alpha de faible radiotoxicité et 0,4 Bq/cm² pour les autres émetteurs alpha.

Les doses induites à proximité des convois de transport de combustibles irradiés sont non négligeables. Une étude menée par l'IPSN suite à l'affaire des transports contaminés en 1998 indique la relation entre contamination de surface et débit de dose correspondant.

Tableau 18 Relation entre contamination de surface et débit de dose lors d'inspections et d'opérations de décontamination de convois contaminés

Activité en surface	3.000 Bq/cm ²	1.200 Bq/cm ²
Débit de dose à 10 cm	20 µSv/h	8 µSv/h
Débit de dose à 1 m	0,27 µSv/h	0,1 µSv/h

Source : IPSN⁵⁴

Pour mémoire le maximum relevé concernant la contamination des transports de combustibles irradiés est allé jusqu'à plus de 10.000 Bq/cm², soit plus de trois fois le niveau le plus haut considéré par l'IPSN pour ses calculs d'impact radiologique. En considérant les chiffres présentés dans le Tableau 18, 50 heures au contact d'un convoi suffisent pour atteindre la limite de dose annuelle recommandée par la CIPR pour l'exposition du public. Pour certains groupes à risque, tels que les travailleurs qui manipulent les châteaux au départ et, surtout, à l'arrivée et les employés de transport, des doses significatives peuvent être réellement atteintes rapidement (voir Annexe 5). Ainsi en 1998, suite à l'affaire des transports contaminés, une dose de 3,85 mSv a été enregistrée pour un employé du terminal de Valognes.⁵⁵ Selon l'IPSN, un personnel travaillant sur un convoi contaminé à 3.000 Bq/cm² lors d'une inspection ou de travaux de décontamination, recevrait une dose de près de 0,01 mSv. Ce chiffre est cependant à modérer, puisque selon les hypothèses de calcul utilisées, le travailleur passerait 15 minutes au contact du convoi et 15 minutes à un mètre de celui-ci. Les hypothèses semblent tout au moins fragiles, d'une part parce que le personnel manipulant les convois voit plusieurs centaines de convois passer au terminal de Valognes chaque année, et d'autre part parce que la méthode de mesure de contamination de surface permet statistiquement de rester aveugle à des points de contamination très élevés, dits points chauds. Enfin, il ne peut être exclu que la durée de manipulation du convoi puisse être allongée de manière importante, pour des raisons diverses et variées.

Cependant, le risque majeur engendré par des contaminations externes réside dans la possibilité de rencontrer des particules de petites tailles, avec un fort rayonnement, capables de se détacher de la surface contaminée pour ensuite soit être inhalées, soit se déposer sur la peau. Dans de tels cas, la dose reçue serait sans commune mesure avec le simple rayonnement provenant de la surface contaminée.

Au risque engendré par les contaminations de surface des transports s'ajoute la dose reçue, y compris en fonctionnement normal, par le rayonnement intrinsèque des emballages de transport contenant des matières contenant du plutonium. Concernant les emballages de combustible usé, l'IPSN donne des chiffres de 0,15 mSv/h au contact et 0,02 mSv/h à un mètre, soit de l'ordre de 100 fois supérieur à la valeur calculée pour les cas de contamination surfacique (voir Tableau 18). Selon ses propres calculs, dans certains cas jugés extrêmes, la dose annuelle reçue par un personnel manipulant de tels emballages pourrait atteindre 8 mSv, dépassant donc la dose autorisée de 5 mSv/an pour les travailleurs de l'industrie nucléaire⁵⁶. Concernant l'exposition du public, l'institut de radioprotection ne donne que peu ou pas d'indications sur le risque pour la population, engendré par le transport de plusieurs centaines d'emballages par an, notamment lors de durées d'exposition qui ne peuvent être négligées, par exemple dans le cas d'embouteillages lors du transit via les banlieues parisiennes et lyonnaises, ou lors du transit de wagons en gare de triage.

⁵⁴ M. Juanola, A. Despres, B. Laurent, *External contamination of spent nuclear fuel casks : radiological impact and remedial actions*, IPSN, non daté.

⁵⁵ Rapport commun des autorités compétentes de France, Allemagne, Suisse et Royaume Uni, *op. cit.*

⁵⁶ IPSN, *op. cit.*

Le Tableau 19 indique quels sont les niveaux maximaux de radiation autorisés selon les différents types de transports, en fonction des types d'emballage de transport.

Tableau 19 Niveaux de radiations autorisés en fonction des types d'emballages de transport

Catégorie	Niveau maximal de radiation (D) en tout point de la surface externe
I	$5 \mu\text{Sv/h} < D$
II	$5 \mu\text{Sv/h} < D < 0,5 \text{ mSv/h}$
III	$0,5 \text{ mSv/h} < D < 2 \text{ mSv/h}$

Au sujet des doses reçues par les employés de transport, le rapport du Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) de 1988 fait état de résultats aux Etats-Unis et au Royaume-Uni pour les effets radiologiques dus à l'ensemble des transports de la chaîne du combustible qui diffèrent de plus d'un facteur 12. Ces résultats diffèrent de plusieurs ordres de grandeur avec les estimations d'une étude menée plus récemment en France par le CEPN (Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire)⁵⁷. D'après le rapport de l'UNSCEAR, une étude américaine aboutit à 4,38 homme.Sv par TWh alors que celle au Royaume-Uni trouve 0,35 homme.Sv par TWh. L'explication de l'UNSCEAR pour cette différence est que l'étude au Royaume-Uni ne prend pas en compte les transports de l'uranium avant son enrichissement, et que les résultats de l'étude américaine seraient « *pessimistes* ». L'estimation de l'UNSCEAR est une moyenne de ces deux chiffres⁵⁸ : 1,75 homme.Sv par TWh. L'estimation du CEPN pour cette dose⁵⁹ est de 0,0012 homme.Sv par TWh, soit autour de 1 000 fois moins...

Concernant les doses reçues par le public, les différences entre les estimations aux Etats-Unis et au Royaume-Uni dans le même rapport de l'UNSCEAR sont bien plus importantes : 4,38 homme.Sv par TWh aux Etats-Unis contre 0,0025 homme.Sv par TWh au Royaume-Uni, soit une différence d'un facteur 1 500 ! « *Principalement sur la base des estimations plus réalistes du Royaume-Uni* », l'UNSCEAR estime que ce chiffre doit être plus faible que celui pour les travailleurs, et lui attribue comme valeur 0,876 homme.Sv par TWh. L'estimation du CEPN pour cette dose est de 0,00133 homme.Sv par TWh, soit à nouveau autour de 1 000 fois moins...

Ces différences de plusieurs ordres de grandeur dans l'évaluation des impacts radiologiques des transports de matières radioactives nous semblent parfaitement inadmissibles d'un point de vue scientifique. On peut également se poser la question de savoir pourquoi les évaluations de doses induites des organismes français semblent se situer systématiquement en bas de l'échelle. L'analyse de ces questions, aussi importantes qu'elles nous paraissent, dépasse largement le cadre de cette étude.

3.3. Les risques en conditions accidentelles

3.3.1. Les risques potentiels liés aux transports

Afin d'assurer la protection des populations dans les situations accidentelles de transports contenant du plutonium, ceux-ci sont tenus par la réglementation au respect de certains critères de résistance, notamment aux chocs et aux feux. Les statistiques disponibles sur les transports, et plus particulièrement sur les transports de matières dangereuses, permettent de confronter ces critères aux situations réelles que sont susceptibles de rencontrer les transports de plutonium.

⁵⁷ Selon *Nucleonics Week* du 16 mars 1995, l'association loi 1901 CEPN compte parmi ses membres le C.E.A., EDF, l'IPSN et la COGEMA. Le Président du CEPN était à l'époque Jérôme Pellissier-Tanon de COGEMA.

⁵⁸ UNSCEAR, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, Comité scientifique des Nations Unies, rapport à l'Assemblée Générale, Nations Unies, New York, 1988.

⁵⁹ M. Dreicer, et al., *Nuclear Fuel Cycle, Estimation of Physical Impacts and Monetary Valuation for Priority Pathways*, Rapport n°234 du Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN), Fontenay-aux-Roses, février 1995.

a) La résistance aux chocs

Une étude de 1989 du CEPN montre que les contraintes réglementaires ne couvrent pas tous les accidents qui se produisent en France sur route⁶⁰. Considérant les contraintes mécaniques, la réglementation indique que les conteneurs des matières qui nous concernent doivent pouvoir supporter une chute de 9 m, ce qui est équivalent à un choc à une vitesse de 46,8 km/h. Le Tableau 20 montre la violence des chocs dans les accidents routiers répertoriés dans les statistiques. Les vitesses équivalentes des tests peuvent être nettement supérieures à la vitesse du véhicule, car il faut prendre en compte l'énergie cinétique de celui-ci.

Tableau 20 Probabilité, dans un accident routier en France, de rencontrer un choc plus sévère qu'un test d'impact, selon la vitesse de test

vitesse d'impact (km/h)	probabilité de dépassement	dont chocs avec train	dont chocs sans trains impliqués
46,8 (test)	0,05		
288	0,0037		
324	0,002	0,00063	0,002
360	0,00089	0,000456	0,0004
396	0,000452	0,000307	0,000145
468	0,000129	0,000116	0,000013

Source : CEPN, 1989

L'information que l'on peut tirer de ce tableau est stupéfiante : dans 5 % des d'accidents routiers répertoriés (ou 1 accident sur 20), la vitesse d'impact est supérieure à celle correspondant au choc réglementaire d'une chute de 9 m. Dans 1 cas sur 10.000 la vitesse d'impact dépasse même 10 fois celle du choc « réglementaire ». En d'autres termes, l'hypothèse selon laquelle un véhicule de transport nucléaire peut être impliqué dans un accident qui crée des conditions dépassant les limites de sa protection contre les chocs est parfaitement crédible.

Dans le cas d'un accident mettant en jeu un transport de matières nucléaires et un transport de matières dangereuses, les vitesses moyennes empruntées par les transports de matières dangereuses, indiquées dans le Tableau 21, montrent que statistiquement, un choc entre les deux transports, y compris si le transport de matières nucléaires se trouvait momentanément immobilisé, dépasserait en intensité le test de chute de 9 m opéré sur les conteneurs de matières nucléaires.

⁶⁰ J.P. Degrange, et al., *Transport de plutonium sous forme oxyde, accidentologie aérienne et routière*, rapport n°138 du Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN), Fontenay-aux-Roses, juillet 1989.

Le CEPN a analysé les environnements routiers et ferroviaires français à la demande de l'IPSN depuis le milieu des années 1975 (et au moins jusqu'à 1986) dans le cadre d'évaluations probabilistes. Voir P. Hubert (CEPN), E. Tomachevsky (CEA-IPSN), *L'analyse des marges de sécurité des emballages pour PuO₂*, Journées Transports, Société française de l'énergie nucléaire et Société française de Radioprotection, 7-8 octobre 1986.

**Tableau 21 Vitesses moyennes pratiquées de jour
par les transports de matières dangereuses (en km/h)**

	1997	1998	1999	2000	2001
Autoroutes de liaison (130 km/h)	83	84	86	86	86
Autoroutes de dégagement (110 km/h)	79	80	83	83	82
Routes nationales à 2 x 2 voies avec chaussées séparées (110 km/h)	80	80	84	84	84
Routes nationales à 2 ou 3 voies (90 km/h)	76	76	74	74	75
Routes départementales à grande circulation (90 km/h)	77	70	71	76	73
Traversées d'agglomérations (< 5 000 habitants) par RN (50 km/h)	56	56	57	58	59

Source : Observatoire de la sécurité routière, 2001⁶¹

Il est à noter que les transports de matières nucléaires ne sont, pour des raisons de sûreté et de sécurité, uniquement pratiqués que de jour – avec cependant des débordements sur les périodes nocturnes éventuels en hiver. On constate que même dans le cas d'un accident entre un transport de matières dangereuses et un transport de matières nucléaires survenant lors d'une traversée d'agglomération, alors qu'il est envisageable que le transport de matières nucléaires puisse être momentanément à l'arrêt, la violence du choc pourrait dépasser celle des tests mécaniques des conteneurs de transport de matières nucléaires. En effet, avec une vitesse moyenne de 59 km/h dans ce type de situation en 2001, la majorité des transports de matières dangereuses circulent pendant la traversée d'agglomérations de moins de 5.000 habitants à des vitesses supérieures à 50 km/h (selon le détail des statistiques publiées par l'Observatoire, ce taux atteint même en fait 73 %).

b) La résistance aux feux

Considérant les contraintes thermiques, la réglementation indique que les conteneurs doivent pouvoir supporter un feu de 800°C de 30 minutes. Le Tableau 22 indique les durées de feux observés sur les routes de France. Les feux de longue durée sont généralement dus à des incendies de citernes transportant par exemple des hydrocarbures.

Tableau 22 Distribution des durées de feux observés sur les transports

Durée	Probabilité de dépassement de la durée lors de feux « marchandises diverses » (total 164 feux)	Probabilité de dépassement de la durée lors de feux « matières dangereuses » (total 66 feux)
20 mn	73 %	
30 mn	49 %	
50 mn	25 %	47 %
60 mn	20 %	
90 mn	8 %	
100 mn		21 %
150 mn		15 %
200 mn		12 %
300 mn		4 %

Source : CEPN, 1989⁶²

⁶¹ Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière, accidentologie concernant les poids lourds, statistiques 2001.

La température des feux est une donnée statistiquement mal connue, parce que difficilement mesurable. Elle est fonction des températures de combustion des matières inflammables, de la nature du sol, la possibilité que des flaques puissent se former, ou du fait que l'incendie se déroule à l'intérieur d'un tunnel. Les données sur des scénarios critiques montrent que la température de 1.000°C peut-être dépassée⁶³.

Le dimensionnement des tunnels face au risque d'incendies donne une indication quant à la durée et la température attendues sur des feux de taille importante. Les courbes des Figures 5 et 6, représentant la montée en température de feux « classiques » et de feux d'hydrocarbures à l'intérieur d'un tunnel telle qu'estimée par le génie civil pour le dimensionnement des matériaux de construction, montrent la rapide montée en température d'un feu d'hydrocarbures. La température de 800°C, température de référence pour les conteneurs de transport, est atteinte en 30 minutes dans le cas de feux dits classiques et en 2 minutes seulement dans le cas de feux d'hydrocarbures.

La rapidité avec laquelle la température de 1.100°C de stabilisation des feux en tunnel n'est pas directement transposable pour des cas de feux en domaines ouverts et l'on peut considérer que, d'une part, cette température pourrait être inférieure et que d'autre part elle ne pourrait être atteinte qu'avec une durée supérieure. Mais il est très vraisemblable que non seulement la température de 800°C serait dépassée et que de plus la durée de feu dépasserait la durée des 30 minutes. A titre indicatif, « *pour les tunnels routiers laissant transiter des véhicules légers et des poids lourds ne transportant pas de matières dangereuses, le degré de résistance au feu vis-à-vis de la stabilité mécanique a pour valeur de référence une heure et demie* », et « *dans tous les cas, l'exigence minimale pour un tunnel routier est fixée à une heure* »⁶⁴. D'autre part, dans le dimensionnement des tunnels, certains matériaux sont prévus pour résister à des feux d'une durée allant jusqu'à quatre heures. Il apparaît donc, si l'on considère le dimensionnement d'infrastructures routières susceptibles d'être touchées par un feu suite à un accident routier, que le dimensionnement des conteneurs de transport de matières nucléaires paraît tout au moins minimaliste, si ce n'est insuffisant au regard des températures et des durées de feux que l'on est susceptible de rencontrer dans certains accidents de la route.

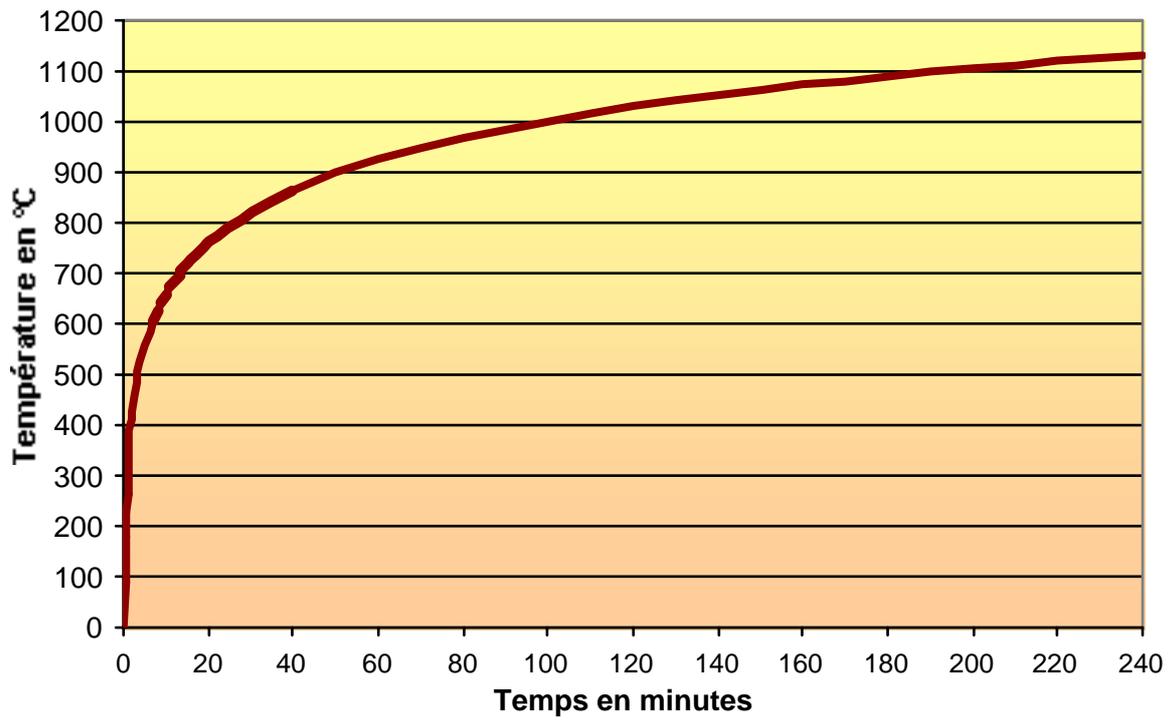
Sur le confinement des matières nucléaires en cas d'incendie grave, le génie civil nous renseigne sur la tenue au feu des structures métalliques : « *si l'acier est chauffé au-delà de 450°C, il ne récupère pas intégralement ses caractéristiques mécaniques après refroidissement* ». Là encore, l'on peut modérer cette affirmation puisque la nature de l'acier joue directement sur sa capacité à retrouver son état initial après refroidissement. Il apparaît cependant que l'on peut s'interroger sur les capacités mécaniques des matériaux utilisés pour l'emballage de transport des matières nucléaires, à retenir ces matières dans le cas de feux tels qu'utilisés pour le dimensionnement d'infrastructures routières. Il est envisageable que des déformations mécaniques irréversibles, engendrées par de puissants feux de longue durée, puissent dégrader les fonctions de confinement des conteneurs de transport de manière importante.

⁶² D'après la Sécurité Civile, dans Degrange, *op. cit.*

⁶³ Degrange, *op. cit.*

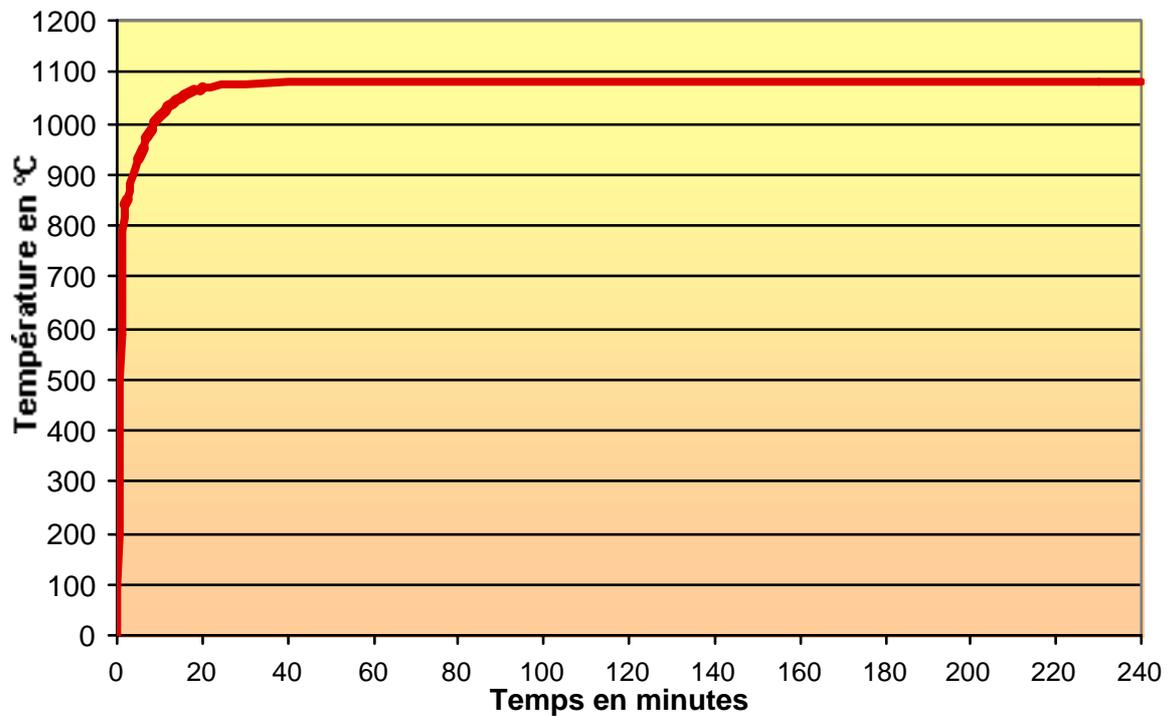
⁶⁴ Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Direction des routes, *Dossier pilote des tunnels – Génie civil*, section 6 « Génie civil lié aux équipements et à l'exploitation », juillet 1998

Figure 5 **Courbe ISO 834 de feu de référence pour les tests et les calculs de dimensionnement des tunnels**



Source : Ministère des Transports, 1998

Figure 6 **Courbe de feu d'hydrocarbures de référence pour les tests et les calculs de dimensionnement des tunnels**



Source : Ministère des Transports, 1998

Sachant que des températures supérieures à 800°C peuvent être atteintes lors d'incendies impliquant des matières dangereuses, il apparaît que les contraintes réglementaires appliquées aux transports de plutonium ne peuvent pas garantir la tenue des colis, le confinement des matières transportées, ni la sous-criticité, dans un accident sur deux concernant les incendies. Dans le cas de l'implication d'un transport de plutonium dans un accident suivi d'un feu impliquant un autre transport de matières dangereuses, une durée de feu au delà de la durée de dimensionnement (30 minutes) est probable.

La libération de quantités significatives de plutonium lors d'accidents susceptibles de dépasser le dimensionnement des conteneurs de transport, en particulier dans le cas d'accidents impliquant des matières dangereuses, ne peut donc être exclue. Afin de compléter cette réflexion, une analyse détaillée des accidents de transports mettant en jeu des matières dangereuses est proposée à l'Annexe 7.

c) Les conséquences potentielles

Dès lors que des accidents graves sont possibles, le développement de scénarios accidentels concernant les transports mettant en jeu des quantités significatives de plutonium est nécessaire pour illustrer le danger apporté par le transport annuel de près de 40 tonnes de plutonium. Du point de vue de la sûreté, le dimensionnement des emballages de transport doit fournir, dans la logique adoptée par les autorités françaises, l'assurance que l'impact d'un accident de transport de plutonium reste limité. De plus, si la sécurité de la phase transport de la chaîne du plutonium semble une priorité au regard de la défense nationale, c'est également probablement le point le plus faible de la chaîne.

L'élaboration précise de scénarios et leur évaluation méthodique est un exercice de grande ampleur. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes limités à décrire, pas par pas, des scénarios possibles d'accidents graves reposant sur des hypothèses réalistes. Les conséquences de ces scénarios ne sont pas calculées de façon détaillée, mais estimées à travers des ordres de grandeur du relâchement potentiel de matières radioactives, de leur dispersion et des doses associées. Le but des scénarios décrits plus loin est de démontrer qu'il existe un certain nombre de cas, dont la liste présentée est non exhaustive, comprenant des hypothèses conservatrices, suffisantes pour dépasser le dimensionnement des emballages de transport en situation accidentelle d'une part, et en cas d'agression externe de type attaque terroriste d'autre part.

Une étude américaine effectuée par le Lawrence Livermore National laboratory⁶⁵ pour l'autorité de sûreté américaine (la NRC, Nuclear Regulatory Commission) en 1987, a calculé la résistance des emballages américains de transport de combustibles irradiés en situation accidentelle⁶⁶. Même si ces emballages diffèrent de ceux utilisés en France, la comparaison reste intéressante puisqu'ils sont dimensionnés avec les mêmes hypothèses dans les deux pays. L'étude montre que si le conteneur est soumis à un feu enveloppant d'une température de 800°C (ce qui correspond, selon l'étude, à un foyer de 900°C), le blindage neutronique subit des dommages irréversibles à partir d'une heure et demi d'exposition au feu, conduisant à des débits de dose proches de 0,1 mSv/h à deux mètres de l'emballage. A partir de 3h20 d'exposition au feu de l'emballage, la dégradation du blindage est jugée grave par l'étude, conduisant à des conséquences radiologiques potentiellement importantes non détaillées dans l'étude.

La même étude analyse également la tenue des emballages à des chocs mécaniques divers. Les calculs effectués pour la NRC montrent que la mise en jeu d'une surface dure (béton, poutrelle métallique, rocher) à une vitesse de plus de 74 km/h lors d'un choc subit par les capots du conteneur (choc par le bout) ou de plus de 82 km/h en ce qui concerne le corps du conteneur (choc par le côté) suffiraient à dégrader les fonctions de confinement de l'emballage.

Les conséquences radiologiques de tels accidents ne sont pas détaillées, mais elles dépasseraient, selon l'étude, les normes de radioprotection américaines. Que ce soit dans le cas d'un endommagement thermique ou mécanique, l'étude affirme que le nombre de crayons par assemblage qui seraient endommagés lors d'accidents mettant en jeu les hypothèses décrites ci-dessus, pourrait aller de 10 % à 100 %. La dose induite par ce type d'accident serait notamment due au relâchement de krypton-85 sous forme de gaz et de vapeurs contenant de l'iode-129.

⁶⁵ Selon l'étude, un feu d'hydrocarbures peut atteindre des températures au foyer allant jusqu'à 1.300°C, mais elle n'étudie pas ce cas.

⁶⁶ Lawrence Livermore National laboratory, *Shipping container response to severe highway and railway accident conditions : main report*, février 1987.

Les conséquences radiologiques d'un accident combinant les hypothèses hors dimensionnement détaillées plus haut ne sont pas décrites dans l'étude, mais les résultats très clairs de celle-ci laissent présager des dégradations importantes des fonctions du blindage neutronique et de confinement des matières radioactives conduisant à un impact très significatif de ce genre d'accident.

Comme le 11 septembre 2002 en avait fait prendre conscience dans le cas des chutes d'avions de ligne chargés en kérozène⁶⁷, l'analyse des accidents de transport de plutonium ne peut reposer sur la seule logique probabiliste, où un accident aux conséquences très graves n'est pas pris en compte parce que sa probabilité d'occurrence est jugée trop faible. Ainsi que l'expliquait l'IPSN⁶⁸ en octobre 2001, l'évaluation du risque doit reposer sur l'identification de la sensibilité du dispositif (le potentiel de relâchement de radioactivité) combinée à sa vulnérabilité (le degré de difficulté d'un tel relâchement).

Les sections suivantes proposent, dans cette perspective d'évaluation, une analyse de scénarios d'accidents de transport ferroviaire et routier, et d'agression externe sur un transport routier. Les estimations proposées, basées exclusivement sur de l'information publique, n'ont pas pour objet de se substituer à l'analyse détaillée de scénarios d'accidents et de leurs conséquences – celle-ci revient aux autorités et à l'organisme expert sur lequel elles s'appuient, l'IRSN –, mais d'apporter des indications sur les degrés de sensibilité et de vulnérabilité de ce maillon fondamental de la chaîne du plutonium.

3.3.2. Scénario d'accident ferroviaire sur un transport de combustible irradié

Dans le scénario développé ci-après, on regardera la tenue des emballages de transport de combustibles irradiés, dans le cadre d'un déraillement de train dans un tunnel. Il est à noter que le déraillement de trains transportant des matières dangereuses restent assez peu nombreux mais que les transport de combustibles irradiés à destination de La Hague ont connu par le passé au moins deux accidents notables de déraillement.

Déraillement d'un train de combustible irradié en gare d'Apach, février 1997

Un convoi de trois wagons transportant des combustibles irradiés en provenance d'Allemagne déraile lors de son passage à la gare frontière d'Apach. Le train roulait à faible vitesse et seuls la voie, les essieux et les tampons des wagons sont endommagés. Un périmètre de sécurité de 200 m de rayon est mis en place et il faudra 24 heures pour relever les colis renversés.

Déraillement de la locomotive tractant un wagon de combustibles irradiés, la Ferté-Saint-Aubin, 14 février 2000

Les essieux avant d'une locomotive tractant un wagon de transport de combustible irradié en provenance de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux quittent les rails au franchissement à faible vitesse d'un aiguillage à la sortie du terminal ferroviaire EDF. Le convoi s'arrête et le wagon reste sans dommage sur les rails. Des contrôles sont réalisés sur l'aiguillage et les voies ferrées pour permettre la remise en ordre de marche du convoi. Cet incident, dû à une erreur de manipulation de l'aiguillage, est classé au niveau 0 de l'échelle INES.

Les deux incidents décrits ci-dessus n'ont eu que des conséquences mineures en terme d'impact mais illustrent la possibilité de déraillement d'un train chargé de combustibles irradiés. Par ailleurs, la grande quantité de conteneurs convoyés chaque année depuis les centrales EDF, couplée au fait que ces transports sont tous obligés de converger sur une voie ferroviaire unique avant d'arriver au terminal ferroviaire de Valognes, focalise l'attention sur ce point de convergence. On observe en particulier que le tunnel de Bernay, un tunnel à deux voies de plusieurs centaines de mètres sur la ligne de Caen, est particulièrement sollicité, puisqu'il semble emprunté par les quelques 250 conteneurs qui circulent en une année pour le transport des combustibles irradiés. Il s'agit essentiellement de combustible UOX irradié mais également des combustibles MOX irradiés en provenance des centrales EDF, tous en direction du terminal de Valognes.

⁶⁷ Voir WISE-Paris, *Les installations nucléaires exposées aux risques de chute d'avion*, Note d'information, 18 septembre 2001.

⁶⁸ IPSN, *La protection des installations nucléaires contre la malveillance*, Note du 30 octobre 2001.

• **Que se passerait-il en cas de déraillement d'un train transportant un ou plusieurs conteneurs de combustible irradié dans le tunnel de Bernay ?**

Afin d'estimer les quantités de matières radioactives potentiellement transférables à l'environnement en cas d'accident, il est nécessaire d'estimer d'abord le contenu possible d'un emballage de transport en éléments volatiles susceptibles de se disperser. Le Tableau 23 donne une estimation du contenu en poids et en radioactivité pour quatre principaux radioéléments, d'un conteneur de type TN 12 contenant 12 assemblages de combustible classique irradié à 45 GWj/t, après quatre ans de refroidissement. Ces éléments, krypton-85 (Kr-85), ruthénium-106 (Ru-106), iode-129 (I-129) et césium-137 (Cs-137), ont été retenus parce qu'ils figurent parmi ceux qui ont le plus grand pouvoir de dispersion. Il faut garder en mémoire que l'inventaire de radioactivité du combustible, donc d'un conteneur type TN 12, est bien supérieur au seul inventaire de quatre éléments utilisés pour l'évaluation.

Tableau 23 Estimation du contenu radioactif d'un conteneur TN 12 chargé de 12 assemblages combustibles irradiés à 45 GWj/t après 4 ans de refroidissement⁶⁹

Isotope	Ci/tML de combustible	Activité massique (Bq/g)	g/conteneur	Bq/conteneur
Krypton-85	10.774	$1,48 \cdot 10^{13}$	149	$2,2 \cdot 10^{15}$
Ruthénium-106	87.314	$1,25 \cdot 10^{14}$	143	$1,8 \cdot 10^{16}$
Iode-129	0,04	$6,17 \cdot 10^6$	1.356	$8,4 \cdot 10^9$
Césium-137	119.741	$3,22 \cdot 10^{12}$	7.623	$2,5 \cdot 10^{16}$

Source : Estimations WISE-Paris, 2002

Il est ensuite nécessaire de donner une description crédible d'un scénario éventuel d'accident incluant le déraillement d'un train de combustibles irradiés, afin de déterminer quelle fraction du contenu de l'emballage de transport est susceptible d'être relâchée dans l'environnement.

Les trains de combustibles irradiés roulent à des vitesses limitées, probablement inférieures à 100 km/h, et cette vitesse descend encore lors du franchissement de passages difficiles (aiguillages, tunnels, passages à niveau, gares) qui varie entre 10 et 30 km/h selon les situations. Il est cependant intéressant de noter que la majorité des accidents de transports ferroviaires interviennent à de très faibles vitesses, lors du franchissement de ces passages délicats. Il est donc tout à fait réaliste d'imaginer le déraillement d'un train transportant du combustible irradié, roulant à une vitesse d'environ 20 km/h., sous le tunnel de Bernay.

Dans ce cas, et si le déraillement se passait une fois le train engagé sous le tunnel, il est peu probable que le conteneur de combustible irradié rencontrerait un obstacle dur, voire saillant, et même si tel était le cas, la faible vitesse à laquelle roulait le train, produirait un choc largement en deçà du dimensionnement mécanique du conteneur. On peut donc conclure que le déraillement en tant que tel, dans ce cas précis, ne serait pas suffisant pour provoquer l'endommagement du conteneur. Il est cependant important de noter que le relèvement du conteneur, serait rendu délicat par le fait que la conformation du tunnel rendrait impossible le grutage du conteneur, la seule solution étant probablement le tractage du conteneur depuis l'une des entrées du tunnel. On dépasserait alors sans doute largement les 24 heures qui ont été nécessaires au relevage du conteneur couché en gare d'Apach en février 1997.

• **Quelles seraient les conséquences d'un choc avec un train s'engouffrant dans le tunnel, en sens inverse, sur une voie où le transport nucléaire est couché ?**

Si un train s'engouffrait dans le tunnel où se trouve couché le transport de combustible irradié suite à son déraillement, le paramètre déterminant est la vitesse pourrait se produire le choc, supposant que le transport nucléaire est immobilisé, et l'angle sous lequel le conteneur est susceptible de recevoir le choc.

⁶⁹ D'après notamment : Groupe Radioécologique Nord Cotentin, *Inventaire des rejets radioactifs des installations nucléaires*, Vol. 1, juillet 1999 ; C. Bataille, R. Galley, *L'aval du cycle nucléaire*, tome 1, Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), Assemblée nationale, juin 1998.

Par manque d'informations publiques dans ce domaine, il est nécessaire d'estimer la vitesse à laquelle peuvent rouler en moyenne les transports ferroviaires de matières dangereuses lors du passage en tunnel. Il semble raisonnable de penser, en particulier par comparaison aux vitesses pratiquées sur autoroute par ce type de transport, que 80 km/h est une moyenne réaliste.

Concernant l'estimation de l'angle sous lequel le conteneur de combustible irradié serait susceptible de recevoir l'impact mécanique maximum, il apparaît que le déraillement d'un transport nucléaire, en particulier à faible vitesse, ferait se coucher le conteneur de transport, ce qui implique un choc « par le bout » du conteneur de combustible irradié. Enfin, afin de décrire complètement le type de choc reçu par l'emballage de transport, il est nécessaire de comprendre que la locomotive du transport serait le premier élément à subir le choc, et il faut donc déterminer si la locomotive serait susceptible de propager l'impact reçu de manière élastique (type boules de billards s'entrechoquant) ou inélastique (avec un facteur d'absorption du choc, ou choc mou).

Les expériences grandeur nature de déraillement de wagons-citernes menées aux Etats-Unis ont montré d'une part que le choc se propage de manière quasi-élastique (avec très peu d'absorption) et que d'autre part les plate-formes de transport, éléments extrêmement rigides, ont tendance à se soulever lors du choc, entraînant le percement des citernes par l'attelage d'un autre wagon. On peut donc considérer que l'impact reçu par le conteneur de combustible irradié équivaldrait donc à un choc jusqu'à 80 km/h, « par le bout », sur un poinçon métallique indéformable.

Ce type de choc, étudié par l'autorité de sûreté américaine en 1987⁷⁰, amène à la conclusion qu'un choc reçu à plus de 74 km/h subit par les capots du conteneur (soit un choc reçu par le bout) contre une surface indéformable suffirait à dégrader les fonctions de confinement de l'emballage de transport. Par ailleurs, d'après cette même étude, et dans le cas du choc qui nous intéresse, au minimum 10 % des crayons de combustible contenus dans l'emballage subiraient des dommages, à savoir des fissures voire des ruptures franches. L'endommagement des crayons combustibles pourrait alors entraîner le relâchement d'une partie des radionucléides contenus dans les crayons fissurés, à l'intérieur du conteneur, soit de l'ordre de 20 % du krypton-85 sous forme de gaz, et moins de 0,1 % de l'iode-129, du césium-137 et du ruthénium-106 sous forme de vapeurs. Enfin, le choc entraînerait le relâchement de fines particules provenant de la brisure et des fissurations des pastilles de combustible. La surpression qui existe à l'intérieur de l'emballage de transport, notamment à cause de la chaleur relâchée par les éléments combustibles, entraînerait plus ou moins rapidement les gaz, les vapeurs et les particules en dehors du conteneur, selon la taille de la brèche ouverte dans l'enveloppe de l'emballage lors du choc. Il est cependant raisonnable de penser, compte tenu des délais d'intervention constatés lors d'incidents mettant en jeu des emballages de transport, que la quasi-totalité des gaz, vapeurs et particules relâchés à l'intérieur du conteneur pourraient être propulsés à l'extérieur avant que la brèche ne soit colmatée.

A ce stade du scénario d'accident, il est possible d'estimer l'ordre de grandeur des premières conséquences potentielles, dues au déraillement puis au choc avec le deuxième train. Le Tableau 24, à partir des hypothèses sur les fractions relâchées et de l'inventaire radioactif du conteneur, permet de calculer des équivalents de dose. L'exercice qui consiste à estimer les doses dues à l'exposition à un relâchement de radioactivité donné est très compliqué. Calculer des doses correspondant à l'évaluation de scénarios d'exposition sortirait largement du cadre de cette étude. Pour mesurer le risque potentiellement lié au relâchement considéré, on se contente ici de calculer, à partir de facteurs de doses spécifiques (type de radionucléide, voie d'exposition), les doses individuelles reçues pour l'exposition à une fraction infime, soit un milliardième, de l'activité relâchée.

Ainsi, dans la situation accidentelle considérée, une personne du public inhalant l'équivalent d'un milliardième des quantités de ruthénium-106 et de césium-137 relâchées recevrait une dose correspondante d'environ 1,3 mSv, supérieure à la limite de 1 mSv fixée par la réglementation pour l'exposition annuelle du public.

Il convient de noter que le raisonnement en dose individuelle, pertinent pour les radionucléides à dispersion limitée, doit être complété par un raisonnement en dose collective globale et à long terme, indispensable pour évaluer l'impact de radionucléides à diffusion globale : c'est le cas du krypton-85, dont la dispersion très rapide et sans limite affecte les populations très au-delà de la zone d'accident, et de

⁷⁰ Lawrence Livermore National laboratory, *op. cit.*

l'iode-129, dont la très longue durée de vie (une période d'environ 16 millions d'année) fait courir l'impact sur de très nombreuses générations⁷¹. Toutefois, nous ne développerons pas ici d'évaluation de l'impact en dose collective des scénarios d'accident.

Tableau 24 Estimations concernant l'impact potentiel à l'étape « choc » d'un scénario d'accident ferroviaire en tunnel

Isotope	Bq/conteneur	Fraction relâchée	Bq relâchés	Principale voie d'exposition	Facteur de dose ^a (Sv/Bq)	Dose pour 1/1 milliard ^b (µSv)
Krypton-85	2,2 . 10 ¹⁵	20 %	4,4 . 10 ¹⁴	Externe	4,4 . 10 ⁻⁹	(1.900)
Ruthénium-106	1,8 . 10 ¹⁶	0,1 %	1,8 . 10 ¹³	Inhalation	1,8 . 10 ⁻⁸	320
Iode-129	8,4 . 10 ⁹	0,1 %	8,4 . 10 ⁶	Inhalation	6,7 . 10 ⁻⁸	(5,6 . 10 ⁻⁴)
Césium-137	2,5 . 10 ¹⁶	0,1 %	2,5 . 10 ¹³	Inhalation	3,9 . 10 ⁻⁸	960

^a Les facteurs de dose indiqués sont des facteurs de dose individuelle correspondant au principal mode d'exposition pour chacun des radionucléides pris en compte : il s'agit respectivement de l'exposition externe pour Kr-85, et de l'inhalation de vapeurs de Ru-106, I-129, et Cs-137.

^b La « dose pour 1/1 milliard » correspond à l'exposition, par la voie indiquée, à un milliardième de l'activité totale relâchée du conteneur pour le radionucléide considéré. Le caractère de dispersion globale de Kr-85 et I-129 rend peu pertinente le calcul de dose individuelle associé ; les résultats obtenus, signalés par des parenthèses, sont cependant donnés à titre indicatif.

Source : Estimations WISE-Paris⁷²

• Que se passerait-il si un feu se déclenchait, suite au choc, en particulier si des matières hautement inflammables étaient mises en jeu ?

Dans le cadre d'un scénario mettant en jeu un emballage de transport de combustible irradié, couché sur une voie de chemin de fer suite à son déraillement, puis percuté par un train venant en sens contraire, il est également important d'envisager le risque d'incendie provoqué par un tel accident. Le risque majeur d'incendie proviendrait essentiellement de la cargaison du train venant en percussion contre le convoi nucléaire ayant déraillé. En effet, dans le cas où cette cargaison ne serait pas inflammable, il est d'une part peu probable qu'un feu se déclenche, et si tel était le cas, le peu de matières inflammables mises en jeu n'aurait que des conséquences mineures sur le scénario d'accident.

Le risque qu'un train venant percuter le premier puisse provoquer un incendie de grande ampleur est cependant très élevé. En 2000 et 2001, le fret ferroviaire de matières dangereuses en France comprenait, à hauteur de près de 50 % du tonnage transporté, des matières inflammables, voire explosives⁷³. Comme le transport ferroviaire de matières dangereuses représente près de 15 % du tonnage total transporté chaque année par la SNCF, les matières inflammables constituent globalement quelque 7 % du fret.

⁷¹ WISE-Paris a analysé en détails, dans un rapport remis en 2001 au Parlement européen, l'importance de cette approche, notamment pour l'iode-129, dans le cas des rejets en fonctionnement des usines de retraitement. Voir Schneider, M. (Dir.), *Possible Toxic Effects from the Nuclear Reprocessing Plants at Sellafield (UK) and Cap de La Hague (France)*, Rapport pour le Scientific and Technological Options Assessment (STOA) du Parlement européen, WISE-Paris, août 2001.
<http://www.wise-paris.org/english/reports/STOAFinalStudyEN.pdf>

⁷² D'après en particulier : M. Dreicer, V. Tort, P. Manen, *Nuclear Fuel Cycle – Estimations of Physical Impacts and Monetray Valuation for Priority Pahtways*, CEPN, Rapport n°234, février 1995 ; RASANET, *Doses per Unit Inhalation for Members of the Public*, IAEA Database, <http://www-rasanet.iaea.org/reference/doselimits.htm>

⁷³ Statistiques de la Société nationale des chemins de fer (SNCF) sur le fret, <http://www.sncf.com/fret/md/centre.htm>.
Sont prises en compte les matières de classe 3 (liquides inflammables, 45 %), et des classes 4.1 à 4.3 (diverses inflammables sous forme non liquide, 4 %). On notera que les matières radioactives (classe 7), représentent 0,5 % du tonnage pour 2000 et 2001.

Dans le scénario étudié, le choc avec un second train présente donc un risque non négligeable de transporter des matières inflammables, susceptibles de provoquer un incendie de grande ampleur. En l'absence de chiffres publics sur les statistiques d'épandage de liquides inflammables lors d'un accident ferroviaire de transport de matières dangereuses, on prendra le chiffre de 51 % donné par la Mission du Transport de Matières Dangereuses (voir Annexe 7) concernant les accidents de la route mettant en jeu ce type de matières. La forte probabilité d'un épandage de matière inflammable lors du choc nous amène donc à regarder l'éventualité où le choc conduirait à un incendie. Du fait de sa prépondérance dans les transports de matières dangereuses, on examinera l'hypothèse d'un feu d'hydrocarbures.

Les wagons transportant des hydrocarbures ont une contenance allant en moyenne de 60.000 à 100.000 litres, et sont transportés par lots de plusieurs wagons. Nous prendrons ici le cas d'un lot de trois wagons de 75.000 litres chacun, soit 225.000 litres d'hydrocarbures au total. Au vu de la probabilité de risque d'épandage, il apparaît que deux des wagons puissent subir des dommages pouvant entraîner l'épandage d'hydrocarbures jusqu'à un total de 150.000 litres, soit plus d'une fois et demie le kérosène contenu dans un Boeing.767. Dans ce cas, il apparaît possible, si ce n'est dans les premières minutes de l'incendie, tout au moins par la suite, que l'emballage de transport de combustible irradié puisse se trouver enveloppé par l'incendie, même si relativement éloigné du foyer initial.

Ce type de feu possède la particularité d'avoir une montée en température extrêmement rapide comparée à d'autres matières inflammables ; il atteint un régime stable en une vingtaine de minutes pour une température proche de 1.200°C. Par la suite, si l'incendie dure plusieurs heures, l'échauffement des parois et des matériaux contenus dans le tunnel et le manque de possibilités efficaces de dissiper la chaleur entraînent une élévation lente de la température au delà de 1.200°C, pouvant atteindre 1.600°C. Les complications engendrées par l'accident d'un transport de combustible irradié survenant dans un tunnel, auxquelles seraient ajoutées les difficultés liées à un incendie d'hydrocarbures de grande ampleur, laissent penser qu'ils faudrait de nombreuses heures avant de pouvoir maîtriser le feu puis opérer sur le conteneur endommagé. Lors de l'incendie sous le tunnel routier du Mont Blanc, le 24 mars 1999, il n'a pas été possible aux pompiers français d'intervenir sur le feu moins de 14 heures après le début de l'incendie. Le 28 septembre 1982, un feu survenu sur un train transportant d'importantes quantités de diverses matières dangereuses dont des hydrocarbures, suite à son déraillement près de Livingston en Louisiane, a nécessité 5 jours d'attente avant que les pompiers puissent intervenir.

Dans le cas d'un feu d'hydrocarbures en milieu ouvert, le carburant brûle rapidement. En revanche, en milieu fermé comme dans le cas du tunnel, le manque d'oxygène régule la combustion du carburant, le feu devient couvant, et peut ainsi durer plusieurs heures, voire plusieurs jours. Lors d'un tel incendie, l'emballage de transport va d'abord lentement monter en température, ses systèmes de ventilation permettant dans un premier temps d'évacuer l'excès de chaleur. Si le feu dure plusieurs heures, comme dans le cas étudié ici, la température du conteneur pourra atteindre plusieurs centaines de degrés. A partir de 330°C, le blindage neutronique en plomb commence à fondre. Si la température du conteneur atteint 350°C, on peut estimer que l'ensemble du blindage en plomb est fondu. Le plomb liquide commencerait alors à suinter en dehors de la double paroi qui le contient, privant lentement le conteneur, et d'abord sa face supérieure, de son blindage neutronique.

Parallèlement, l'élévation de température à l'intérieur du conteneur provoquerait un phénomène d'oxydation des éléments combustibles. A titre d'exemple, l'étude américaine citée plus haut⁷⁴ a calculé la réponse thermique d'un conteneur exposé à un feu enveloppant de 800°C. Il s'avère que dans ce cas précis, la température de 350°C est atteinte par le conteneur en 2 heures environ. Si l'on considère que la montée en température du conteneur est proportionnelle à la température de la flamme, alors pour un feu de 1200°C, la température de fusion du blindage de 350°C pourrait être atteinte dès 40 minutes. Il est nécessaire de noter, qu'avec la même méthode d'estimation, il est vraisemblable qu'une température proche de 900°C puisse être atteinte par le conteneur à partir de 3 heures 30 d'exposition ; à cette température, le zirconium composant les gaines contenant le combustible est susceptible de démarrer une ignition spontanée, dite feu de zirconium.

En dehors du cas « feu de zirconium », et avant même 350 °C, le combustible va subir un phénomène de fluage thermique entraînant des fissures dans le combustible, et, par la suite provoquera la rupture d'un

⁷⁴ Lawrence Livermore National laboratory, *op. cit.*

certain nombre de crayons. L'étude américaine note qu'au delà de 350°C, on peut s'attendre à des ruptures des crayons combustibles allant jusqu'à 100 % du contenu de l'emballage. Par ailleurs dès 205°C, si de l'oxygène est encore présent, ce qui est possible puisque cette température serait atteinte en 20 minutes environ, un phénomène d'oxydation se mettra en place suite au remplacement du gaz inerte contenu dans le conteneur de transport par l'oxygène, accélérant le processus de relâchement de gaz et de vapeurs. En dehors du cas « feu de zirconium », c'est-à-dire en dessous de 3 heures 30 d'exposition à un feu enveloppant de 1.200°C, on peut s'attendre à un relâchement d'isotopes radioactifs beaucoup plus important que par le simple choc ; à savoir près de 40 % du krypton-85 sous forme de gaz et de l'ordre de 1 % de l'iode-129, du césium-137 et du ruthénium-106 sous forme de vapeurs.

A ce stade du scénario d'accident, il est nécessaire de ré-estimer les conséquences possibles de l'accident liées au choc puis au feu. Le Tableau 25 indique les ordres de grandeur de relâchement d'activité, et les doses potentiellement engagées par l'exposition à une fraction de cette activité, à cette étape. Dans les mêmes conditions d'exposition, l'inhalation par une personne du public d'un milliardième des quantités de ruthénium-106 et de césium-137 relâchées conduit à une dose dix fois plus importante que dans le cas d'un simple choc. Cette exposition pourrait conduire une personne du public à recevoir une dose de l'ordre de 13 mSv (ou 13.000 µSv), plus de dix fois supérieure à la limite réglementaire annuelle. L'inhalation d'une quantité dix fois moindre, soit un dix milliardièmes de l'activité relâchée, suffit à dépasser cette limite.

Tableau 25 Estimations concernant l'impact potentiel à l'étape « choc + feu » d'un scénario d'accident ferroviaire en tunnel

Isotope	Bq/conteneur	Fraction relâchée	Bq relâchés	Principale voie d'exposition	Facteur de dose ^a (Sv/Bq)	Dose pour 1/1 milliard ^b (µSv)
Krypton-85	2,2 . 10 ¹⁵	40 %	4,4 . 10 ¹⁴	Externe	4,4 . 10 ⁻⁹	(3.900)
Ruthénium-106	1,8 . 10 ¹⁶	1 %	1,8 . 10 ¹³	Inhalation	1,8 . 10 ⁻⁸	3.200
Iode-129	8,4 . 10 ⁹	1 %	8,4 . 10 ⁶	Inhalation	6,7 . 10 ⁻⁸	(5,6 . 10 ⁻³)
Césium-137	2,5 . 10 ¹⁶	1 %	2,5 . 10 ¹³	Inhalation	3,9 . 10 ⁻⁸	9.600

^{a,b} Voir Tableau 24

Source : Estimations WISE-Paris⁷⁵

• ***Que se passerait-il si le feu n'était pas maîtrisé suffisamment rapidement pour empêcher l'apparition de feux de zirconium au sein du combustible ?***

A partir de 900°C, soit la température d'ignition des gaines de combustible, il est très difficile d'estimer l'impact sur le combustible. Il apparaît cependant clairement que le processus de fracturation et d'oxydation du combustible s'accélère, entraînant un relâchement massif d'isotopes radioactifs. A ces températures, les dégradations opérant sur le combustible sont telles que l'on peut considérer que 50 à 100 % des gaz nobles et des produits de fission peuvent être relâchés. Parallèlement, alors que très peu de particules sont susceptibles d'être relâchées à des températures inférieures à 900°C, l'importante fracturation du combustible et l'éclatement des gaines de combustible dans le cas d'un feu de zirconium entraînent la production et la dispersion de particules, y compris des particules de taille inférieure à 10 µm, taille considérée comme inhalable. De plus, à ces niveaux de température, le comportement des enveloppes métalliques constituant le conteneur de transport devient incertain, et les contraintes thermiques appliquées en particulier aux joints d'étanchéité, laissent penser que la dilatation serait suffisante pour créer de nouveaux points d'échappement des isotopes relâchés à l'intérieur du conteneur. Dès lors, la quasi-totalité des isotopes relâchés dans le conteneur seraient susceptibles d'être également relâchés dans l'environnement.

A ce stade ultime du scénario d'accident, il est nécessaire une nouvelle fois d'estimer les conséquences possibles de l'accident liées au choc puis au feu, lui-même déclenchant une ignition du zirconium des

⁷⁵ Sources identiques à l'estimation d'impact à l'étape « choc », voir Tableau 24.

gaines des crayons de combustible. Dans un tel scénario, les quantités dégagées sont suffisantes pour provoquer un impact bien au-delà des limites de radioprotection, ainsi que le montre le Tableau 26. En appliquant à nouveau le même raisonnement, on constate que, dans l'hypothèse d'un relâchement de 50 % des quantités de ruthénium-106 et de césium-137 présentes dans le conteneur, l'inhalation par une personne d'un milliardième de ces relâchements entraînerait une dose équivalente supérieure à 500 mSv, soit 500 fois supérieure à la limite annuelle de dose pour les membres du public.

Tableau 26 Estimations concernant l'impact potentiel à l'étape « choc + feu + feu de zirconium » d'un scénario d'accident ferroviaire en tunnel

Isotope	Bq/conteneur	Fraction relâchée	Bq relâchés	Principale voie d'exposition	Facteur de dose ^a (Sv/Bq)	Dose pour 1/1 milliard ^b (µSv)
Krypton-85	$2,2 \cdot 10^{15}$	100 %	$4,4 \cdot 10^{14}$	Externe	$4,4 \cdot 10^{-9}$	(9.700)
Ruthénium-106	$1,8 \cdot 10^{16}$	50 %	$1,8 \cdot 10^{13}$	Inhalation	$1,8 \cdot 10^{-8}$	160.000
Iode-129	$8,4 \cdot 10^9$	50 %	$8,4 \cdot 10^6$	Inhalation	$6,7 \cdot 10^{-8}$	(0,28)
Césium-137	$2,5 \cdot 10^{16}$	50 %	$2,5 \cdot 10^{13}$	Inhalation	$3,9 \cdot 10^{-8}$	480.000

^{a,b} Voir Tableau 24

Source : Estimations WISE-Paris⁷⁶

• *Quel serait l'impact final d'un tel scénario ?*

Les estimations des quantités rejetées aux différentes étapes du scénario d'accident, ainsi que les ordres de grandeur de doses associées à l'exposition à différentes fractions de ces quantités, ne permettent pas d'estimer à proprement parler l'impact d'un tel accident. Cela nécessiterait notamment un travail difficile d'évaluation des fractions réellement susceptibles d'être inhalées par les personnes du public (notamment par l'analyse de scénarios calculés avec des modèles de dispersion). Les estimations de WISE-Paris conduisent cependant à penser que les expositions induites pourraient atteindre des niveaux équivalents, voire bien supérieurs aux limites de doses établies pour la protection du public, soit 1 mSv/an. Le fait que seule une faible partie des radionucléides potentiellement relâchés ait été pris en compte pour ces estimations renforce cette conclusion.

L'impact lié au relâchement de matières n'est pas le seul élément à prendre en compte. Il est certain, en particulier, que les équipes de secours opérant sur le conteneur endommagé, du fait de la perte du blindage neutronique seraient soumis à un intense rayonnement neutronique, dont le niveau, difficile à estimer – mais certainement susceptible d'atteindre plusieurs dizaines de millisieverts par heure –, dépendrait de la nature de la dégradation du conteneur. Il serait probablement impossible à une seule équipe d'opérer la récupération du conteneur, sous peine de recevoir en quelques minutes des doses bien au-delà des limites autorisées.

Enfin, il est nécessaire de regarder l'impact post-accidentel d'un tel événement. En effet, même si le relâchement de radioisotopes lors de l'accident n'impliquerait pas des doses pour les secouristes et les pompiers au delà de quelques millisieverts, la contamination de l'environnement par dépôt des éléments radioactifs en dehors du tunnel doit être évaluée. Le but du présent scénario n'est pas de donner le chiffre exact du possible impact local d'un tel accident mais il permet toutefois de donner des ordres de grandeur.

Dans une situation de contamination comme peut en produire ce scénario, le seul dépôt post-accidentel de césium-137 donne une idée de l'ampleur de l'impact au niveau local. Ce radionucléide joue un rôle déterminant dans les doses aux populations induites par une contamination durable de leur environnement : à lui seul, le césium-137 est ainsi jugé responsable de près de 75 % de l'impact lié aux retombées de l'accident de Tchernobyl⁷⁷.

⁷⁶ Sources identiques à l'estimation d'impact à l'étape « choc », voir Tableau 24.

⁷⁷ Voir notamment l'Annexe D de UNSCEAR, *Sources, Effects and Risks Of Ionizing Radiation*. UNSCEAR, Vienne, 1988.

Dans le scénario d'accident impliquant un conteneur TN 12 de combustible irradié et conduisant au feu de zirconium, près de 7,5 kg de césium sont mis en jeu et sont susceptibles d'être volatilisés pour tout ou partie. Cependant, le fait que le relâchement initial se fasse sous tunnel laisse supposer qu'il est peu probable que 100 % du césium puisse se répandre dans l'environnement. Par ailleurs, le fait qu'il n'y ait pas de possibilités d'échappement par le haut pour les vapeurs et les gaz laisse supposer que le dépôt, contrairement au dépôt très étendu dans le cas d'un panache, ne pourrait se faire que dans un rayon de quelques kilomètres, voire quelques dizaines de kilomètres autour des points d'entrée et de sortie du tunnel.

Sans entrer dans le détail des caractéristiques de dépôt prévisibles dans un tel scénario, on propose d'évaluer l'ampleur de la contamination à travers un calcul simple. On suppose pour cela que 3,8 kg, c'est-à-dire la moitié du césium sont relâchés par le conteneur au cours du feu de zirconium, et que la moitié de cette quantité, soit près de 1,9 kg, va se déposer uniformément et localement dans un rayon de 30 km à partir des points d'entrée du tunnel. La surface recouverte, près de 2.800 km², ferait alors l'objet d'une contamination surfacique d'environ 2 à 3 MBq/m² (million de becquerels par mètre carré). Cette valeur de contamination surfacique est à comparer à celle de 1,5 MBq/m² qui a été retenue comme limite basse pour définir la zone d'exclusion de 30 km autour de Tchernobyl.

En effet, de tels niveaux de contamination sont susceptibles d'engendrer des doses atteignant quelques dizaines de millisieverts, voire 100 mSv par an chez les personnes vivant la zone contaminée. Le scénario d'accident ferroviaire grave calculé ici est corroboré par les résultats d'une étude indépendante américaine réalisée pour l'état du Nevada⁷⁸. Dans cette étude, il a été démontré dans le cas d'un accident en tunnel, que la dose susceptible d'être reçue en un an, par des personnes vivant à près de 30 km du lieu de l'accident pouvait encore atteindre de l'ordre de 6 à 90 mSv selon le lieu considéré, les modèles de dispersion et d'impact utilisés, dès la première année suivant l'accident.

Le scénario décrit ci-dessus montre que d'une part l'éventualité d'un déraillement d'un transport de combustibles irradiés en situation délicate de type tunnel, aggravé par le choc avec un train de marchandises dangereuses, ne peut être écartée, et que d'autre part, les conséquences potentielles peuvent atteindre localement plusieurs dizaines de fois les limites de doses annuelles autorisées pour le public. La situation post-accidentelle après un tel événement serait localement comparable à celle de la zone d'exclusion de Tchernobyl.

3.3.4. Scénario d'accident routier de transport de poudre d'oxyde de plutonium

Dans ce scénario, on analysera la tenue des emballages de transport d'oxyde de plutonium, dans le cadre d'un accident du camion de transport. Le scénario d'accident sera développé en deux branches optionnelles, l'une en situation purement accidentelle, et l'autre en situation accidentelle après une agression externe de type attaque terroriste. Le choix d'étudier les conséquences possibles d'une attaque terroriste sur un transport d'oxyde de plutonium, est motivé par le fait que l'oxyde de plutonium, matière fissile, par sa forme pulvérulente très dispersable, est la matière de la chaîne du combustible présentant le plus grand intérêt du point de vue d'une action malveillante, et que c'est lors de son transport qu'elle présente la plus grande faiblesse vis-à-vis d'une agression externe.

• Option 1 : Situation accidentelle

Il n'existe pas à proprement parler d'exemples d'accident de transport d'oxyde de plutonium, mais quelques exemples d'accidents de la route mettant en jeu des transports nucléaires.

Combustibles irradiés 30 heures dans le fossé - Lailly en Val, 15 juin 1987 :

« Accident de circulation impliquant un transport d'éléments combustibles irradiés venant de la centrale de Saint-Laurent A et se dirigeant vers la gare de la Ferté St Aubin.

Pour laisser passer une voiture qui doublait son camion, le chauffeur a fait une manœuvre qui a légèrement déporté la remorque sur le côté et celle-ci a basculé vers le fossé. L'emballage, qui était

⁷⁸ M. Lamb, M. Resnikoff, *Worst Case Credible Nuclear Transportation Accidents: Analysis for Urban and Rural Nevada*, Radioactive Waste Management Associates (RWMA), août 2001

simplement posé et maintenu par des cornières guides sur le plateau de la remorque, a basculé et est tombé dans le fossé, s'enfonçant de plus d'un mètre dans la terre.

Les interventions de divers services ont permis de maîtriser la situation dès les premiers instants et de façon continue. La gendarmerie, renforcée de l'armée, a assuré le bouclage et la sécurité du chantier. La CMIR du Service Départemental d'Incendie et de Secours a effectué des mesures radiologiques permettant de vérifier l'absence de risque d'exposition et de contamination. L'installation par les pompiers d'un PC mobile muni de moyen radio et équipé de lignes téléphoniques par les PTT a assuré la continuité des liaisons avec les diverses autorités concernées. Les personnels du CEA, de l'IPSN et d'EDF dépêchés sur les lieux pouvaient à tout instant, en liaison avec le directeur de la centrale de Saint-Laurent, faire intervenir tout moyen spécifique qu'aurait exigé la situation.

Toutefois, les moyens techniques, diligentés par COGEMA, n'ont pu être acheminés qu'après d'importants délais lié à la nature même des matériels de levage et de terrassement ; en particulier la grue venant de Limoges est arrivée près de 30 heures après l'accident. Une fois sur place leur mise en œuvre a permis de résoudre rapidement les difficultés ».

L'accident décrit ci-dessus n'a eu à priori que des conséquences mineures, et aucune dispersion de matières radioactives n'a été reporté, cependant il n'illustre absolument pas les conséquences engendrées par un accident plus grave, et de plus démontre que les emballages transportés sont susceptibles de se renverser lors de situations de conduite délicates. Le fait que les transports d'oxyde de plutonium empruntent plus d'une centaine de fois par an des trajets dont certains passages, telles les banlieues parisiennes et lyonnaises, ont des caractéristiques de densité de population élevée, nécessite d'étudier les conséquences d'un accident grave à ces endroits.

• *Que se passerait-il dans le cas d'un accident impliquant le versement d'un camion de transport d'oxyde de plutonium ?*

Afin d'estimer l'impact potentiel d'un tel accident, il faut déterminer le terme source susceptible d'être relâché dans le cadre de la description qui sera faite plus loin, l'aire concernée par la dispersion et la densité de population que l'on est susceptible d'y rencontrer.

Les transports d'oxyde de plutonium comprennent généralement 10 conteneurs de type FS47 pouvant contenir chacun jusqu'à 15 kg de plutonium réparti en cinq boîtes de 3 kg chacune. Cependant, les chiffres publics diffèrent quant au contenu réel d'un tel transport, allant de 120 à 150 kg d'oxyde de plutonium par transport. Selon toute vraisemblance, l'équivalent d'un FS47 soit 15 kg, reste inutilisé en moyenne à chaque transport, que ce soit du fait d'un sous-remplissage des boîtes de 3 kg pour des raisons de sûreté, ou de l'utilisation d'un FS47 vide par transport comme leurre pour des raisons de sécurité. De fait, on choisira en moyenne 135 kg comme quantité totale transportée par chaque camion circulant entre les usines de retraitement de La Hague et les usines de fabrication de combustible MOX de Cadarache (ATPu), Marcoule (MELOX) ou Dessel (P0).

Il s'avère que, pour rejoindre les usines MOX de Marcoule et Cadarache, les trajets des camions d'oxyde de plutonium empruntent la banlieue parisienne, l'Autoroute du Sud puis le contournement de Lyon. Dans le présent scénario, on a choisi de regarder l'impact d'un accident survenant lors du contournement de Lyon au passage d'un pont surplombant l'autoroute.

Les vitesses auxquelles roulent les transports de plutonium sont probablement relativement faibles au regard des vitesses pratiquées sur l'autoroute, et en l'absence de données publiques à ce sujet, le scénario prendra comme hypothèse une vitesse moyenne de 80 km/h⁷⁹, une vitesse inférieure étant potentiellement dangereuse sur des voies de circulation à grande vitesse. Les causes possibles d'un versement de l'emballage de transport sont multiples et l'on en citera deux rencontrées fréquemment dans la vallée du Rhône et une plus générale : la vallée du Rhône, pour des raisons climatiques récurrentes, est souvent soumise à des vents nord-sud de forte intensité descendant la vallée du Rhône et capables de déstabiliser les remorques de transport, mais également des plaques de verglas soudaines capables de faire perdre le contrôle à des véhicules lourdement chargés ; enfin le fait qu'un accident de la route puisse survenir

⁷⁹ La vitesse moyenne pratiquée de jour sur l'autoroute par les transports de matières dangereuses est de l'ordre de 86 km/h depuis 1999.

devant le transport nucléaire, sans même le mettre en jeu directement, est un facteur potentiel de renversement de l'emballage transporté.

Suite à une perte de contrôle du véhicule de transport, et au versement de la remorque et/ou au détachement de l'emballage de transport, l'emballage – qui pèse plus d'une tonne et demie – se mettra à glisser sur la chaussée à une vitesse proche de la vitesse initiale du camion au moment de sa perte de contrôle. Dès lors, puisque le paramètre déterminant pour la tenue de l'emballage est sa résistance aux chocs, il faut regarder quelles surfaces l'emballage est capable de rencontrer dans sa trajectoire. Si le glissement le dirigeait vers les bas-côtés, il n'y rencontrerait probablement que des surfaces meubles (accotements, talus) ou molles (glissières) dont les caractéristiques physiques laissent penser qu'un percement d'un des dix FS47 est peu probable. Par contre, si l'emballage rencontrait une surface dure, voire même anguleuse, il est possible que l'écrasement et/ou le percement d'un ou plusieurs FS47 puisse survenir. Cette éventualité est à regarder si la perte de contrôle intervenait à proximité d'un des nombreux ponts surplombant l'autoroute ; dans ce cas, il existe une probabilité non négligeable pour que l'emballage de transport finisse sa course dans une des piles du pont, surface dure et généralement anguleuse.

Dans ce cas précis, le scénario laisse envisager une vitesse d'impact avec un pilier en béton proche de 80 km/h, mais il est également nécessaire de regarder sous quel angle éventuel est susceptible de se produire l'impact. Le fait que la remorque de transport se renverse suggère une embardée du camion lors de sa manœuvre d'urgence. Dès lors, la remorque risquera de se trouver dans une position proche de la perpendiculaire au sens de circulation, puis de glisser dans cette position, ce qui laisse entendre, au vu de la disposition verticale des FS47 dans leur rack de transport, que l'impact avec la pile du pont est susceptible de se produire par le bout d'un ou plusieurs conteneurs. Dans une telle éventualité, on se reportera ici encore à l'étude menée en 1987 pour la NRC⁸⁰ citée plus haut pour conclure que dans le cas précis décrit ici, les fonctions de confinement d'un ou plusieurs FS47 seraient dégradées, laissant la possibilité d'un échappement de poudre de plutonium. Il est difficile d'estimer quelle quantité de poudre de plutonium serait éventuellement relâchée suite au choc, mais l'étude américaine de 1987 laisse penser, même si elle n'étudie que le cas de combustibles irradiés en situation accidentelle, que la fraction solide relâchée serait de l'ordre du dix millième de pourcent du contenu total d'un conteneur, soit dans le cas qui nous préoccupe, de l'ordre de 5 mg si l'on ne considère l'endommagement que d'une boîte métallique d'un FS47, contenant 2,7 kg de plutonium⁸¹. Le risque encouru par un tel relâchement n'est certes pas élevé si l'on considère la dispersion de cette quantité sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés, mais il est nécessaire de considérer l'impact possible dans l'environnement immédiat de l'accident, à savoir les personnes mises en jeu lors de l'accident et les premières équipes de secours.

Tableau 27 Dose induite par l'inhalation d'un gramme de poudre de plutonium

Isotope du plutonium	Activité massique (Bq/g)	Composition isotopique (%)	Voie d'exposition	Facteur de dose (Sv/Bq)	Dose induite (Sv)
Plutonium-238	$6,23 \cdot 10^{11}$	3,1 %	Inhalation	$1,6 \cdot 10^{-5}$	309.000
Plutonium-239	$2,28 \cdot 10^9$	52,4 %	Inhalation	$1,6 \cdot 10^{-5}$	19.100
Plutonium-240	$8,39 \cdot 10^9$	24,5 %	Inhalation	$1,6 \cdot 10^{-5}$	32.900
Plutonium-241	$4,81 \cdot 10^{12}$	12,2 %	Inhalation	$1,7 \cdot 10^{-7}$	99.800
Plutonium-242	$1,45 \cdot 10^8$	7,8 %	Inhalation	$1,5 \cdot 10^{-5}$	170

Source : OPECST, AIEA⁸²

⁸⁰ Lawrence Livermore National laboratory, *op. cit.*

⁸¹ Contenu moyen d'une boîte calculé sur la base de 135 kg transportés au total, soit 13,5 kg par FS47 en moyenne répartis en cinq boîtes de 2,7 kg.

⁸² Sources : pour la composition isotopique du plutonium dans le combustible irradié à 47,5 GWj/t après 5 ans de refroidissement : C. Bataille, R. Galley, *L'aval du cycle nucléaire*, tome 1, Rapport de l'Office Parlementaire

Le Tableau 27 donne la dose induite par l'inhalation d'un gramme de plutonium de composition isotopique standard pour le plutonium issu du combustible irradié. Dans le cas présent, les quelques milligrammes relâchés représentent donc une dose équivalente de l'ordre de 2.500 Sv au total, soit près de 500 doses létales de 5 Sv. Il est certes exclu que cette dose totale représente la dose apportée aux personnes mises en jeu dans les premières minutes de l'accident, mais elle montre le risque extrêmement élevé pour ces mêmes personnes de recevoir des doses significatives, voire même mortelles suite au choc intervenant sur un des dix conteneurs, puis la dispersion d'une infime fraction de son contenu.

Le risque de criticité, c'est-à-dire le risque que se déclenche une réaction de fission en chaîne, engendré par la compaction de la poudre de plutonium sous l'effet d'un choc important tel que celui que nous envisageons ici serait également à étudier. Cette question demanderait une étude à part entière, aucune étude n'ayant été rendue publique sur ce problème spécifique de la situation accidentelle. Selon une étude du CEPN, la tenue du conteneur lors d'un accident équivalent à un choc du conteneur seul à 468 km/h aurait été évaluée (la probabilité qu'un tel choc se réalise n'est que de une pour 10.000 accidents, comme on l'a vu dans le Tableau 20). L'étude du CEPN confirme que le choc conduit à « *un fort compactage* » de l'oxyde de plutonium, sans évaluer si ce compactage est suffisant pour dépasser le seuil de criticité et initier une réaction nucléaire⁸³.

Le risque d'un sur-accident engendré par le versement en travers de la route du rack de transport de près de 2 m de haut, 1 m de large sur près de 5 m de long, est également à considérer dans une zone dont l'infrastructure routière à circulation dense, compte un nombre élevé de transports de matières dangereuses. En effet, 86.000 poids lourds dont 6 % transportant des matières dangereuses transitent chaque jour en région lyonnaise, et plus de 50 % des matières dangereuses correspondent à des produits inflammables avec une prépondérance notable des hydrocarbures⁸⁴.

• ***Que se passerait-il si un camion transportant des hydrocarbures venait percuter le conteneur de plutonium renversé en travers de la chaussée ?***

Les camions-citernes transportant des hydrocarbures sont réglementairement limités à 80 km/h sur autoroute, mais la pratique et les statistiques relevées de jour concernant les vitesses observées sur les transports de matières dangereuses montrent que cette vitesse est en moyenne systématiquement dépassée. Il paraît dès lors important de considérer un choc entre l'emballage de transport d'oxyde de plutonium et un camion-citerne, engagé par exemple initialement dans une manœuvre de doublement du transport nucléaire. On considérera dès lors que le deuxième choc se produira à une vitesse de 80 km/h, l'emballage de transport de plutonium étant encastré dans la pile de pont.

Au vu de la situation décrite jusqu'ici, on constate que le deuxième choc correspond de nouveau à un impact par le bout (au niveau des capots de protection). Cependant, il apparaît que le choc entre l'emballage de transport et le camion-citerne doit être considéré comme un choc « mou », les tôles et le bloc moteur du camion-citerne étant prévus pour produire un effet d'amortissement lors d'un choc. Dans ce cas, il est peu probable que l'emballage de transport soit suffisamment dégradé pour provoquer le relâchement de poudre de plutonium. Selon toute vraisemblance, c'est le camion-citerne qui encaissera la plus grande partie du choc. Cependant, et justement parce que c'est le transport d'hydrocarbure qui subira la contrainte du choc, il est très probable d'assister au percement de la cuve d'hydrocarbure. Dès lors le risque d'incendie ne peut plus être écarté. Par ailleurs, le choc entre l'emballage de transport et le camion-citerne va conduire à répéter le choc entre l'emballage de transport et la pile du pont par transmission de l'énergie cinétique du camion-citerne via l'emballage de transport qui est rigide. Pour ce choc précis, on regardera la description qui a été faite plus haut du premier choc entre l'emballage de

d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), Assemblée nationale, juin 1998 ; pour les facteurs de dose pour les différents isotopes du plutonium : RASANET, *Doses per Unit Inhalation for Members of the Public*, IAEA Database, <http://www-rasanet.iaea.org/reference/doselimits.htm>

⁸³ Dreicer et al., 1995, *op. cit.* La réduction en volume de la poudre de plutonium, donc le taux de compression, n'est pas indiquée. Une précédente étude du CEPN indique qu'une diminution d'un volume d'oxyde de plutonium de 45% est suffisante pour atteindre la criticité : P. Hubert, P. Pagès, *Risk Analysis of the Transportation of Plutonium Dioxide*, CEPN, rapport n°49, novembre 1981.

⁸⁴ Source : Secrétariat permanent pour la prévention des pollutions industrielles et des risques dans l'agglomération lyonnaise (SPIRAL). <http://www.lyon-spiral.org>

transport et la pile de pont. L'effet produit par ce deuxième choc ne peut que provoquer une dégradation supplémentaire sur les fonctions de confinement d'un ou plusieurs FS47. Dans ce cas, on considérera ici la fraction solide susceptible d'être relâchée suite au deuxième choc comme multipliée par deux et on se reportera aux conséquences radiologiques dues au choc, telles qu'elles ont été calculées plus haut.

Enfin, l'effet d'un incendie, dont il semble probable qu'il soit enveloppant pour le conteneur de transport au vu du déroulement du scénario accidentel, doit être étudié. La différence de ce type d'incendie avec le cas du feu de tunnel est essentiellement le fait qu'il se déroule en milieu ouvert. Dans ce cas précis, les temps de montée en température du conteneur, ainsi que les limites hautes de température pouvant être atteintes sont modifiées par le fait que la chaleur dégagée par l'incendie est directement dispersée dans l'atmosphère et que l'on ne se trouve pas en situation de sous oxygénation du feu pouvant en réguler la durée. De fait, avec la même hypothèse de température de flamme de 1.200 °C, il faudra un temps plus long pour atteindre la température de 650°C au niveau du conteneur, suffisante pour en dégrader le blindage neutronique.

Par contre, le fort dégagement de chaleur occasionné par la combustion du carburant répandu, aura pour effet de créer un effet dit de cheminée, correspondant à un flux ascendant capable de soulever et transporter des particules de petite taille, du type de celles contenues dans les conteneurs de poudre de plutonium. Il est donc nécessaire de regarder quelle quantité de plutonium est susceptible d'être dispersée, transportée puis déposée par ce phénomène thermique. En effet, quelle que soit la température atteinte par le conteneur, c'est le mécanisme de dispersion décrit ci-dessus qui sera déterminant dans le calcul d'impact de l'accident.

La fraction totale de poudre, dispersée lors de cet accident, dépendra du nombre de conteneurs endommagés et de la quantité de poudre que le ou les conteneurs endommagés relâcheront après le choc, sous l'effet de brassage mécanique que l'incendie est capable de provoquer à l'intérieur du conteneur. Connaissant le diamètre de 75 cm des conteneurs FS47, il semble raisonnable de penser que le contenu de deux boîtes métalliques dans deux FS47 distincts puisse être mis en jeu lors de l'accident, soit deux fois 2,7 kg ou 5,4 kg au total. En l'absence de chiffres publics à ce sujet, il a été choisi de calculer l'impact dû à la dispersion de 1 % du contenu des deux boîtes métalliques, soit 54 grammes de poudre de plutonium.

Considérant que le plutonium se répandra, sous l'effet du vent, sur une aire de forme elliptique., il est possible, en se basant sur les calculs de dispersion et d'inhalation de poudre de plutonium effectués par Steve Fetter et Frank von Hippel en 1990⁸⁵, validés par la suite par le Department of Energy américain, de calculer les doses induites par l'accident. Afin d'estimer la population concernée par l'impact de l'accident, on considérera la densité de population de 500 habitants/km², correspondant aux couronnes de banlieue les plus éloignées du centre de Lyon.

Le calcul montre qu'une zone elliptique de 33 km de long sur 1,5 km de large sera concernée par le dépôt maximum de plutonium, soit une zone de l'ordre de 12 km², ce qui suggère un impact possible sur une population de l'ordre de plus de 6.000 personnes. La décroissance de la dose induite en fonction de l'éloignement au lieu de l'accident suggère que des doses supérieures à la dose annuelle autorisée pour l'exposition du public seraient atteintes jusqu'à 15 km du lieu de l'accident. Ces résultats sont représentés sur la Figure 7.

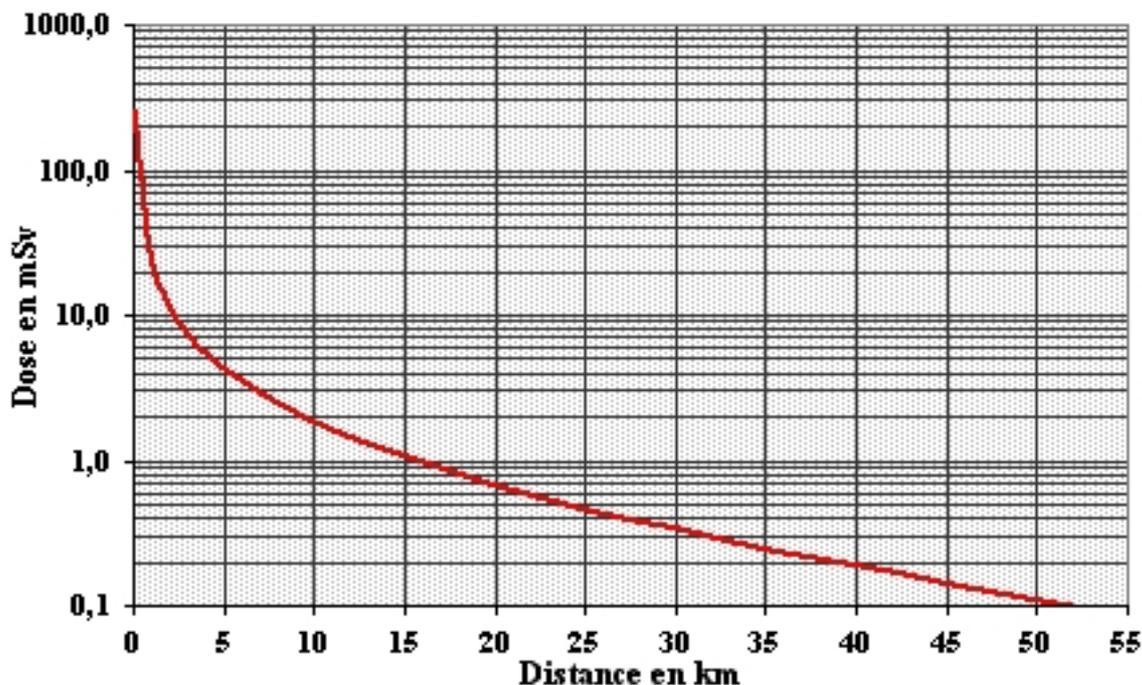
De fait un calcul effectué par le Department of Energy américain simulant une explosion au Los Alamos National Laboratory⁸⁶ avec relâchement de 400 g de plutonium (uniquement composé de l'isotope Pu-239) dans l'atmosphère suggère des doses induites chez les individus inhalant le plutonium entre 1,8 Sv sur le lieu de l'accident et près de 8 mSv à 50 km. Si l'on considère que le scénario accidentel étudié ici met en jeu huit fois moins de matière relâchée (en ne considérant que le plutonium-239), il est envisageable de considérer des doses induites probables comprises entre quelques 200 mSv sur le lieu de l'accident et moins de 1 mSv à 50 km, confirmant par là même les ordres de grandeur des doses calculés ci-dessus.

⁸⁵ S. Fetter, F. von Hippel, « The Hazard from Plutonium Dispersal by Nuclear-Warhead Accidents », *Science & Global Security*, 1990.

⁸⁶ C. M. Steele, T. L. Wald, D. I. Chanin, *Plutonium Explosive Dispersal Modeling Using the MACCS2 Computer Code*, Department of Energy, Los Alamos Area Office, 5/1997.

Si l'on considère le risque de cancer fatal induit par des doses radiologiques, en appliquant le facteur proposé par la CIPR60, à savoir 5 % par homme.Sv, la mortalité immédiate engendrée par l'accident dépasserait sans doute entre dix et vingt morts dans des délais variables ⁸⁷.

Figure 7 Distribution de la dose reçue par la population en fonction de la distance au lieu de l'accident entraînant le relâchement de 54 g de plutonium



Source : WISE-Paris, 2003

• Option 2 : Situation d'agression externe

Il est assez aisé d'imaginer un scénario d'attaque du transport d'oxyde de plutonium capable d'engendrer des conséquences pour les populations environnantes. Pour mémoire, on rappellera que les attentats du 11 septembre 2001 ont impliqué 19 personnes prêts à et capables de mettre fin à leurs jours dans le seul but d'accomplir leur action malveillante.

Un scénario d'attaque d'un transport de plutonium pourrait mettre en jeu un tireur embusqué sur un pont, équipé d'un lance-missile, ainsi qu'un conducteur pilotant un camion suicide chargé d'hydrocarbures. Pour mémoire, le 27 août 2001, un lance-roquette a été saisi à Saint-Fons, en banlieue lyonnaise⁸⁸, et il faut rappeler que plusieurs sociétés offrent la possibilité de louer des camions-citernes, y compris à des particuliers. Par ailleurs on peut se souvenir que le 19 janvier 1982, la centrale de Superphénix fut touchée par l'impact de quatre tirs de roquettes occasionnant d'important dégâts matériels.

Il est assez aisé de développer un scénario comme suit : le camion d'hydrocarbure suit le transport de plutonium à moins de 5 km, distance parcourue en moins de trois minutes et demie à la vitesse de 90 km/h. Avec un minimum de coordination, de type talkie-walkie, le tireur immobilise le transport par un voire deux tirs de roquettes, le transport n'ayant sur l'autoroute aucune échappatoire, puis le conducteur du camion-suicide vient en moins de quatre minutes s'encastrent dans le conteneur de transport de plutonium. Une charge simple, correctement disposée est alors capable de faire exploser la citerne de carburant.

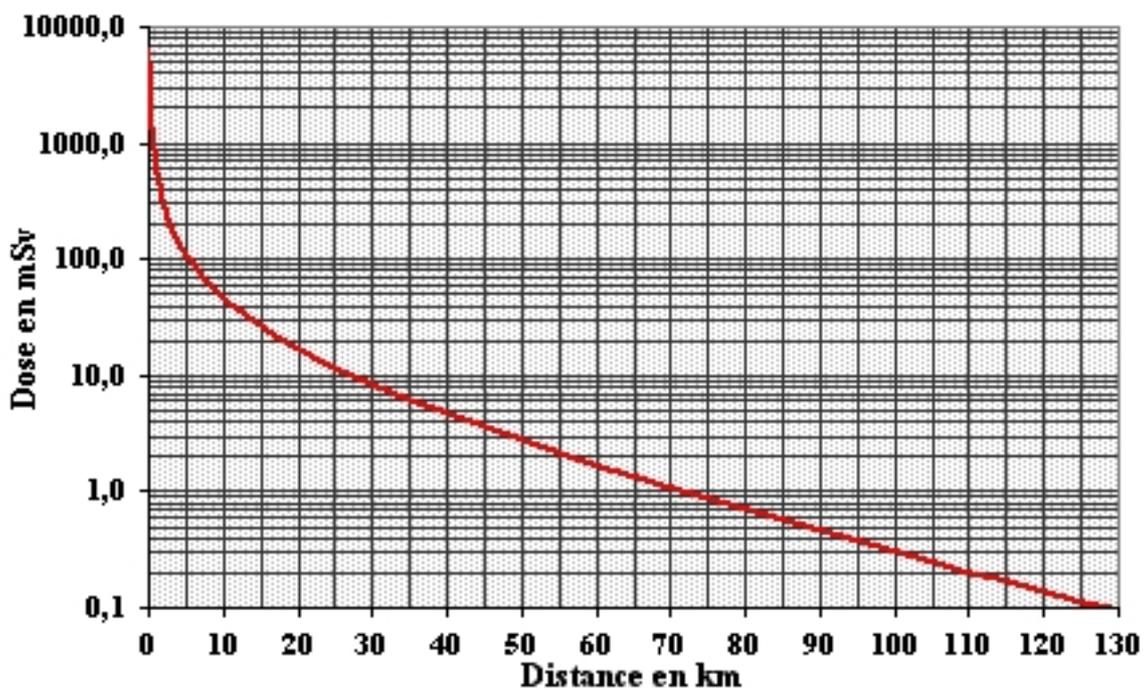
⁸⁷ CIPR, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, publication 60 adoptée en novembre 1990.

⁸⁸ *L'Humanité*, « Saisie d'armes près de Lyon », 5 septembre 2001.

Dans un tel scénario, qui, soulignons le, n'est pas le plus extrême imaginable, il suffit de la coordination de deux hommes volontaires pour atteindre un impact considérable sur l'intégrité du transport de plutonium. Sans connaissances précises sur les différents types d'armements, il est toutefois difficile d'évaluer l'impact potentiel des tirs, donc de la suite de l'attaque, sur le conteneur de transport. Toutefois, il paraît raisonnable de penser qu'un tel scénario aurait un impact dévastateur sur au moins un conteneur FS47. Nous prendrons donc comme hypothèse, dans cette version du scénario accidentel, le relâchement de 10 % du contenu total d'un FS47. On considère donc qu'une quantité totale de 1,35 kg de plutonium serait libérée par l'impact de la roquette puis dispersée par l'incendie provoqué par le camion-suicide.

L'impact, estimé avec le même code de calcul que dans l'option 1 du scénario, montre que l'on peut s'attendre à une ellipse de dispersion de l'ordre de 100 km de long sur 10 km de large, soit une zone de 250 km², concernant une population de 125.000 habitants. La distribution des doses dans cette ellipse montre que la dose annuelle de 1 mSv, qui est la limite fixée pour l'exposition du public, serait atteinte jusqu'à 70 km au moins du lieu de l'accident. Cette distribution est représentée à la Figure 8.

Figure 8 Distribution de la dose reçue par la population en fonction de la distance au lieu de l'accident entraînant le relâchement de 1.350 g de plutonium



Source : WISE-Paris, 2003

La mortalité intrinsèque d'un tel accident, par inhalation de particules de plutonium par les habitants de la zone concernée, serait susceptible de provoquer plus de 500 cancers fatals. Par ailleurs, considérant les directions générales des vents à ce niveau de la vallée du Rhône, si les scénarios décrits ci-dessus prenaient place dans la banlieue nord, même lointaine de Lyon, au vu de l'étendue de la zone contaminée et des niveaux de contamination engendrés, il est possible qu'en l'absence d'une décontamination au coût inchiffrable, la ville de Lyon et sa banlieue deviendraient une zone d'exclusion pour des centaines voire des milliers d'années.

3.4. Conclusions sur les risques associés aux transports

Les matières nucléaires transportées par centaines de convois chaque année sont une source de dangerosité parmi les plus importantes de toutes les classes de matières dangereuses. Les dangers liés à la manipulation et au transport du plutonium touchent au risque de criticité (le déclenchement de réactions de

fission), à sa très grande radiotoxicité et au problème de prolifération (le détournement de matières pour la fabrication d'une arme atomique). A ces risques classiques s'ajoute, illustré par les attaques du 11 septembre 2001, la menace d'actes terroristes contre les transports, ou de vol de plutonium pour son utilisation dans un engin explosif nucléaire ou dans une « bombe sale ».

Dans les conditions normales de transport, les niveaux de rayonnement neutronique et de contamination des transports, couplés au nombre d'emballages transportés chaque année induisent des doses non négligeables aux personnels concernés par le transport. Ils constituent de plus un risque pour la population lié à l'inhalation ou au dépôt de particules fortement rayonnantes, qui est généralement négligé.

La sûreté des transports de plutonium est, dans la logique développée par les autorités françaises, garantie par des contraintes réglementaires sur la résistance des colis de transport aux chocs (une chute de 9 m sur une surface indéformable, ou de 1 m sur une barre métallique) et à l'incendie (un feu d'hydrocarbures de 30 minutes à 800°C), ainsi qu'à l'immersion (sous 15 m d'eau pendant 8 heures).

Il apparaît que le dimensionnement mécanique et thermique des emballages de transport est au moins minimaliste voire insuffisant au regard des conditions de transport rencontrées sur la route et des hypothèses considérées pour le dimensionnement des infrastructures routières. Selon les statistiques sur les transports de matières dangereuses et les accidents, les contraintes réglementaires ne sont pas suffisantes pour garantir totalement la tenue des colis, donc le confinement des matières transportées ou la sous-criticité, dans un accident de la route sur 20 concernant les chocs, et dans un accident sur deux concernant les incendies.

En situation accidentelle, des relâchements de radioactivité significatifs peuvent être envisagés. Ceux-ci dépendent du type de transport (rail ou route), des quantités et des catégories de matières mises en jeu (combustible irradié, poudre d'oxyde de plutonium, combustible MOX non irradié), et des circonstances de l'accident.

Nous avons développé trois scénarios d'accident afin d'illustrer le potentiel de risque :

Un scénario d'**accident ferroviaire**, avec déraillement d'un convoi de **combustible irradié** dans un tunnel comme celui du Bernay, proche de Caen, puis percution par un autre train, peut conduire à des relâchements de matières radioactives équivalents à un milliard de fois, par inhalation, la limite de dose annuelle de 1 mSv pour les personnes du public. Dans le cas d'un incendie provoqué dans le tunnel par le second train, les quantités pourraient être jusqu'à 500 fois plus importantes. Ce relâchement pourrait conduire à une contamination équivalente à celle observée dans la zone d'exclusion de Tchernobyl.

Un scénario simple d'**accident affectant un camion** de transport de poudre d'oxyde de **plutonium** pourrait conduire au relâchement de l'équivalent de quelques centaines de doses létales. Quelques dizaines de µg (microgrammes) de plutonium inhalés suffisent à provoquer un cancer mortel. En cas de choc important des conteneurs de plutonium, par exemple avec une pile de pont, le risque d'un accident de criticité ne peut être écarté. De plus, l'impact serait là encore beaucoup plus lourd en cas de percution par un camion-citerne et de feu d'hydrocarbures. Si un tel accident se produisait dans la banlieue nord de Lyon, plus de 6.000 personnes pourraient se trouver dans la zone de retombée, une ellipse de 12 km² environ. L'accident provoquerait quelques dizaines de cancers fatals.

Dans un scénario semblable, mais où l'**accident est déclenché par un acte de malveillance**, comme un tir à l'arme lourde sur le camion de plutonium, la zone pourrait atteindre 250 km² et concerner une population de 125.000 habitants. Susceptible de provoquer plus de 500 cancers fatals, il conduirait à la nécessité d'évacuer une partie de la ville de Lyon et de sa banlieue, sans espoir de retour pour une durée indéterminée.

L'élaboration détaillée de scénarios d'accident de ce type dépasserait largement le cadre de cette étude. Il serait souhaitable que les autorités compétentes chargent ses appuis techniques, en l'occurrence l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) des calculs détaillés des conséquences de ce type d'accident. Les résultats de ces études devraient être rendus publics et mis à disposition notamment des élus locaux confrontés au quotidien aux transports des matières au plutonium.

4. La réglementation applicable aux transports de plutonium

Les transports dont il est question dans le présent rapport sont soumis simultanément à deux ensembles de réglementations, répondant à deux objectifs.

Premièrement, du point de vue de la sûreté, les transports des matières radioactives en général sont soumis à la réglementation sur le transport des matières dangereuses⁸⁹. Les dispositions réglementaires portent sur l'emballage, l'expédition, la manutention et le chargement, ainsi que le transport proprement dit. Elles s'adressent à l'expéditeur sous la responsabilité duquel s'effectue le transport.

Deuxièmement, du point de vue de la prolifération, les matières dites matières nucléaires, sont soumises à la législation sur le contrôle et la protection physique⁹⁰, relative à la prévention des pertes, disparitions, vols et détournement pour éviter l'utilisation de ces matières à des fins militaires ou terroristes. En France, ces matières classées nucléaires sont au nombre de six : uranium, plutonium, thorium, deutérium, tritium, et lithium-6.

Les activités liées aux transports de plutonium, de combustibles MOX frais et irradiés et de combustibles standard irradiés sont ainsi soumises principalement à l'autorité de trois ministères : celui des Transports pour les aspects relevant de la réglementation sur le transport de matières dangereuses, ceux de l'Industrie et de l'Intérieur pour les aspects relatifs à la « protection physique ». De plus, les transports de marchandises en général, et de matières dangereuses en particulier doivent obéir à des règles de circulation spécifiques. Ils peuvent en outre faire l'objet de restrictions de circulation adoptées au niveau du préfet ou du maire, dans le cadre de ses pouvoirs de police.

Dans le présente chapitre, l'utilisation du terme de matière « radioactive » renvoie à la réglementation sur le transport des matières dangereuses et l'utilisation du terme de matière « nucléaire » à la législation sur la protection physique des matières nucléaires.

4.1. Cadre réglementaire général des transports

4.1.1. Les recommandations internationales

• Les recommandations de l'AIEA

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) a pour mission, entre autres, celle d'élaborer des recommandations relatives au transport de matières radioactives. Ces recommandations sont appliquées par tous les Etats concernés par ce type d'activité, notamment en France.

La philosophie des réglementations de l'AIEA est de faire reposer la sûreté du transport, en tout premier lieu, sur l'intégrité de l'emballage, quelque soit le mode de transport utilisé. Les critères de conception correspondants prennent en compte la radioactivité et la forme sous laquelle la matière est transportée. Pour vérifier leur résistance et garantir leur sûreté, les emballages sont soumis à une série de tests réglementaires.

L'AIEA élabore, coordonne et publie, depuis 1961, une réglementation, révisée et mise à jour, concernant tous les modes de transport, ainsi que des guides d'application. La dernière révision date de 1996 et vient

⁸⁹ RTMDF (règlement sur le transport de matières dangereuses par voie ferrée), arrêté du 3 juin 1994 document n°48, JO du 14 juin 1994 ; et RTMDR (règlement sur le transport de matières dangereuses par route) n° 113 du 23 décembre 1994, JO du 27 décembre 1994.

⁹⁰ Loi du 25 juillet 1980 sur la protection physique des matières nucléaires.

d'aboutir à une refonte complète, applicable à partir de 2001. Appelées Safety Requirements, les prescriptions de l'AIEA remplacent désormais les anciennes Safety Series.

Le but recherché au travers de ces prescriptions est d'abord de maîtriser les risques radiologiques auxquels les personnes, les biens et l'environnement pourraient être exposés du fait du transport des matières radioactives. Les règles de protection relatives à ces risques sont applicables à tous les modes de transport : route, rail, mer, air, voie fluviale, voie postale...

Le principe admis est que la sûreté du transport doit reposer sur trois « lignes de défense » :

- l'emballage, qui doit être robuste et adapté à son contenu dans le but de réduire les risques au plus bas niveau possible et de les aligner sur les matières les moins dangereuses. Les phases de sa conception et de son agrément doivent prendre en considération les moyens de transport auxquels il est destiné ;

- la fiabilité des moyens de transport, notamment des équipements spéciaux des véhicules, et y compris le respect rigoureux des exigences de sûreté lors des opérations de chargement, de transport proprement dit et de déchargement ;

- l'efficacité des moyens d'intervention mis en œuvre face à un accident ou un incident afin d'en prévenir les conséquences.

Pour assurer le respect de ces préceptes et la responsabilisation des opérateurs, la responsabilité de la sûreté est confiée à l'exploitant nucléaire expéditeur, et il ne peut s'en dégager que par des dispositions contractuelles expresses. De plus, ce transfert contractuel de responsabilité ne peut s'effectuer que vers un autre exploitant nucléaire, c'est à dire un autre professionnel du secteur nucléaire ayant connaissance des règles de sûreté et placé de ce fait sous le contrôle des pouvoirs publics.

• Les règles de l'OMI

S'agissant des dispositions relatives à la sûreté des navires transportant des matières nucléaires, l'Organisation Maritime Internationale (OMI) a adopté le 4 novembre 1993 et amendé le 27 novembre 1997, le Recueil INF⁹¹. Il est défini comme étant un ensemble de règles pratiques pour la sûreté du transport de combustible irradié, de plutonium et de déchets fortement radioactifs à bord des navires.

• La réglementation européenne

En Europe, deux directives sont particulièrement importantes pour le transport des matières nucléaires et radioactives. Il s'agit de la directive 94/55 du 21 novembre 1994 et de la directive 96-49 du 23 juillet 1996, qui ont respectivement approché la réglementation des Etats membres sur le transport des marchandises dangereuses par route et par voie de chemin de fer.

4.1.2. La réglementation sur le territoire français

Le transport des matières radioactives et/ou nucléaires est soumis dans le dispositif législatif et réglementaire français à différents textes suivant le mode de transport utilisé (route, rail, air et mer). Pour la plupart ces réglementations sont basées sur la transposition en droit français des conventions internationales et des directives européennes.

• Champ d'application et textes de référence

La loi du 5 février 1942 a établi le principe d'une réglementation du transport des matières dangereuses, par chemin de fer, par route, ou par voie de navigation intérieure. Par la suite, la loi du 31 décembre 1975, relative à la constatation et à la répression des infractions en matière de transports publics et privés a fixé les sanctions applicables aux infractions commises à l'encontre de ce règlement. Cette loi a été complétée par le décret d'application du 30 novembre 1977.

A cette législation et à ses textes d'application sont venus s'ajouter, plus récemment, la directive n°94/55 et la directive 96-49 du Conseil des Communautés Européennes (voir paragraphe 4.1.1 ci-dessus), prises

⁹¹ Le recueil INF (Irradiated Nuclear Fuel) s'applique aux navires qui transportent des combustibles nucléaires usés, du plutonium et des déchets de haute activité et comporte des dispositions relatives à la conception et à l'équipement de ces navires.

elles-mêmes en application des accords européens relatifs au transport international des marchandises dangereuses par route (A.D.R.) et par chemin de fer (R.I.D.).

La liste des matières dangereuses présentant des risques d'explosion, d'incendie, de toxicité, de corrosivité, de rayonnement radioactif, ainsi que les critères de leur classement sont précisés dans le Règlement du transport des marchandises dangereuses (Arrêtés du 15 avril 1945, du 15 septembre 1992, du 3 juin 1994 et du 12 décembre 1994).

• **La réglementation du transport par route**

Le transport des matières radioactives et/ou nucléaires est régi par le règlement du transport des marchandises dangereuses par route, fixé par un arrêté du 12 décembre 1994, reprenant les prescriptions de l'accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route, dit A.D.R. dont la dernière édition date du 1^{er} janvier 1997. La directive européenne 94-55 a, quant à elle, été transposée en droit interne par l'arrêté du 5 décembre 1996, modifié le 17 décembre 1998.

En application de cette directive, le règlement fait l'objet aujourd'hui d'un seul texte comportant les annexes techniques de l'A.D.R. et précisant, selon la nature du transport, les règles particulières applicables en France.

• **La réglementation du transport ferroviaire**

La réglementation du transport des matières dangereuses par voie ferrée est régie en France par un arrêté du 6 décembre 1996 transposant la directive 96/49 du 23 juillet 1996.

Les règles techniques relatives à la définition des matières et aux emballages sont analogues à celles du transport routier. Certaines règles spécifiques concernent les wagons-citernes, la circulation et le stationnement des wagons de transport des matières dangereuses. Ces dispositions visent à éviter le stationnement prolongé des wagons sur les lignes des réseaux, de façon à ce que le stationnement se fasse uniquement à l'intérieur des installations classées intéressées et selon les normes propres à chaque installation.

• **Le transport par voie de navigation intérieure**

Le transport de matières dangereuses par voie de navigation intérieure est soumis au règlement de 1945 modifié pour les transports français, et à un accord international pour le transport sur le Rhin (A.D.N.R.).

• **Les transports maritime et aérien**

Le transport maritime en France doit satisfaire, pour sa part, aux dispositions du Code sur le Transport Maritime International de Marchandises Dangereuses ou Code IMDG (International Maritime Dangerous Goods Code), adopté par l'Organisation Maritime Internationale (OMI)⁹².

Ce code sert de guide aux personnels chargés de la manutention et du transport de matières dangereuses, dont les matières radioactives, dans les ports et à bord des navires. Il décrit l'ensemble des dispositions à respecter en matière d'identification des emballages, de marquage, d'étiquetage, de placardage, d'arrimage, de documentation et de prévention de la pollution marine.

La réglementation concernant l'Aviation Civile est publiée dans le Journal Officiel Les circulaires expliquent les textes réglementaires mais n'ont pas de valeur réglementaire. Un ensemble d'ouvrages de synthèse regroupent les textes parus dans le Journal Officiel :

- code de l'Aviation Civile,
- règlement de la circulation aérienne (RCA) et règlement du transport aérien (RTA),
- publications d'Informations Aéronautiques (AIP),
- atlas VAC (Visual Approach and landing Chart), avec les cartes d'approche et d'atterrissage à vue,
- atlas IAC (Instrument Approach Chart) : cartes d'approche aux instruments,
- brochures complémentaires.

⁹² Arrêté du 10 juillet 2001 portant modification du règlement annexé à l'arrêté du 18 juillet 2000 relatif au transport et la manutention des matières dangereuses dans les ports maritimes.

4.1.3. La réglementation en matières d'emballages

• Agréments

Les colis de type B (voir l'explication des catégories de colis en Annexe 5) ainsi que les colis pour matière fissile sont soumis à l'agrément des autorités compétentes – en France et pour les matières à usage civil, la Direction Générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection (DGSNR)⁹³, par délégation du ministre en charge de l'industrie et de la ministre en charge de l'environnement. Ces agréments sont délivrés pour une durée déterminée, en général quelques années.

Les normes de performance des colis de type B pour matière fissile sont les suivantes :

- confinement, limitation de la contamination externe du colis et limitation de l'intensité de rayonnement autour du colis en conditions de transport de routine ;

- conservation du confinement des matières radioactives et limitation de l'augmentation de l'intensité de rayonnement autour du colis à 20 % à la suite des épreuves représentatives des conditions normales de transport (voir ci-dessous) ;

- relâchement d'activité en une semaine plafonné à l'activité maximale autorisée dans un colis de type A et intensité de rayonnement limitée à 10 mSv/h à 1 m de distance du colis à la suite des épreuves représentatives des conditions accidentelles de transport (voir ci-dessous) ;

- maintien de la sous-criticité d'un colis isolé et d'un réseau de colis, avec ou sans eau, en toutes situations (routine, normales et accidentelles).

La DGSNR est en relation avec les administrations chargées des différents modes de transport et possède un représentant à la Commission interministérielle du transport des matières dangereuses (CITMD).

Elle dispose d'un « Groupe d'Experts », chargé spécifiquement du transport des matières radioactives, constitué le 1^{er} décembre 1998, qui examine des dossiers individuels, tels que prévus dans les différentes procédures d'agrément, ainsi que des sujets génériques⁹⁴.

• Types d'emballages utilisés

Les règlements d'agrément des colis sont adaptés des règles émises par l'AIEA⁹⁵. Ces règlements considèrent trois types de situation en cours de transport :

- les conditions de transport de *routine*. A ce niveau, aucun incident ou accident n'est pris en compte, les emballages font l'objet de sollicitations ordinaires ;

- les conditions *normales* de transport. Ce niveau intègre la prise en compte d'incidents et d'accidents mineurs représentés par des épreuves auxquelles l'emballage doit résister telles que :

- chute de 1,2 m du colis sur une surface indéformable,
- gerbage sur le colis de 5 fois sa masse,
- chute d'une barre métallique de 6 kg sur le colis... ;

- les conditions *accidentelles* de transport. Celles-ci correspondent à la prise en compte d'accidents sévères, basé sur un nombre limité de critères de résistance. L'ensemble des situations d'accident sévère auxquels peuvent être soumis les emballages est représenté par les épreuves suivantes :

- chute de 9 m du colis sur une surface indéformable,
- chute de 1 m du colis sur une barre métallique,
- feu d'hydrocarbure de 30 minutes à 800 °C,
- immersion sous 15 m d'eau pendant 8 heures,
- immersion sous 200 m d'eau pendant 1 heure.

⁹³ La DGSNR a succédé en mars 2002 à la Direction de la sûreté des installations nucléaires (DSIN).

⁹⁴ Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP), *Le Retraitement – Recyclage et le Transport des Matières Nucléaires en France*, 20 juillet 2001

⁹⁵ Bruno Desnoyers, « La sûreté des transports du plutonium », ASN, *Contrôle* n°138, janvier 2001.

4.2. Procédures, applications et pratiques

Les règlements de transport de marchandises dangereuses de même que les règles applicables à la protection physique et au contrôle des matières nucléaires en cours de transport requièrent notamment que des notifications préalables (ou avis préalables) soient effectuées. En France, celles-ci sont effectuées auprès de la Direction de la sécurité civile (pour faciliter et réduire les délais d'intervention en cas d'accident) et de l'Echelon opérationnel des transports de l'Institut de Radioprotection et de la Sûreté Nucléaire (IRSN)⁹⁶ (pour le suivi en temps réel des matières nucléaires en cours de transport).

Les sociétés et les véhicules utilisés pour ces transports doivent être agréés par les autorités compétentes en charge de la protection physique et du contrôle des matières nucléaires en cours de transport.

Depuis juin 1997, la DGSNR (alors encore dénommée Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires, DSIN) est l'autorité compétente pour la sûreté des transports de matières radioactives. Elle est placée sous la triple autorité de la ministre de l'Ecologie et du Développement Durable et du secrétaire d'Etat à l'Industrie, dépendant du ministre de l'Economie, des Finances et de l'Industrie et du ministre de la Santé.

L'IRSN intervient dans le suivi de l'application de la réglementation relative à la radioprotection. Le ministère de l'Intérieur, quant à lui, élabore les plans d'urgence, mis en œuvre par les préfets, les PSSTMR (Plan spécialisé de secours pour le transport des matières radioactives) et NUCMAR (transports maritimes).

4.2.1. Sûreté dans le transport des matières radioactives

• Le suivi des matières nucléaires à des fins de non-prolifération

Les dispositifs de sécurité mis en place s'appuient sur les normes élaborées par l'AIEA en application du Traité de Non-Prolifération des Armes Nucléaires (TNP) et à ceux de la Convention sur la Protection Physique des Matières Nucléaires (AIEA/INFCIRC 274), instruments tous deux ratifiés par la France.

La loi du 25 juillet 1980 et ses divers textes d'application, dont le décret du 12 mai 1981 (voir Annexe 3) et l'arrêté du 26 mars 1983, ont pour objectif de prévenir le vol ou le détournement, à des fins malveillantes, des matières nucléaires détenues dans les installations ou en cours de transport. Dans cette perspective, ces textes soumettent les détenteurs et les transporteurs à l'obtention d'une autorisation générale préalable d'exercice de leur activité. Ils leur imposent en particulier de mettre en place des mesures destinées à assurer la protection des matières qu'ils détiennent ou transportent et, naturellement, les assujettissent à un mécanisme d'inspection in situ.

Le Haut Fonctionnaire de Défense auprès du ministre de l'Économie, des Finances et de l'Industrie est le responsable de la mise en œuvre de cet ensemble législatif et réglementaire. Pour ce faire, il dispose d'un service spécialisé, le Service du Contrôle des Matières nucléaires et sensibles (SPCMN). Service de Protection et de Contrôle des Matières Nucléaires (Ministère de l'Industrie). Placé sous l'autorité du HFD (Haut fonctionnaire de la Défense), il a été créé en 1981 pour prendre en charge la mise en œuvre de la loi du 25 juillet 1980. Pour l'accomplissement de sa mission, ce dernier service bénéficie du concours et de l'expertise technique de l'IRSN. Pour ce qui concerne les transports, l'IRSN est chargé, sous son autorité, d'une mission de gestion opérationnelle et de suivi des transports de matières nucléaires.

Dans ce contexte, le transporteur autorisé par la loi doit adresser, pour chaque opération de transport, un préavis à l'IRSN décrivant les conditions d'exécution du mouvement : nature et quantité de la matière transportée, lieu de départ et d'arrivée, itinéraire, horaire, point de passage de frontière le cas échéant, etc. Après instruction, le dossier est transmis au SPCMN pour décision finale d'autoriser ou non l'exécution du transport, prise par le Haut Fonctionnaire de Défense.

Le déroulement de l'opération fait l'objet d'un suivi assuré par l'IRSN. A cet effet, le transporteur est tenu d'assurer une liaison entre le convoi et l'IRSN afin d'être en mesure de l'informer sans délai de tout incident susceptible de retarder ou de compromettre l'exécution du mouvement, à charge pour l'IRSN d'en rendre compte au Haut Fonctionnaire de Défense. Si les circonstances l'exigent, le ministère de l'Intérieur met en place un dispositif destiné à préserver l'ordre public et à permettre l'exécution du

⁹⁶ L'IRSN a succédé en mars 2002 à l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN).

transport dans les conditions prévues. Cette mise en place résulte d'une collaboration étroite entre le SPCMN et la Direction générale de la Police nationale.

4.2.2. Itinéraires et informations

Dans la réglementation sur le transport des matières dangereuses, il n'existe aucun agrément des itinéraires. Il n'y a pas non plus de critères de choix guidés par les spécifications relatives aux colis, par exemple éviter un pont d'une hauteur supérieure à neuf mètres ou éviter les axes empruntés par les transports d'autres matières dangereuses notamment les matières inflammables. C'est la philosophie de l'infailibilité du colis, résumée ainsi par Claude Ringot et Jacques Lombard de l'IPSN : « *Conséquence du premier principe [la sûreté repose essentiellement sur le colis, ndlr], n'importe quel mode de transport peut être utilisé (sauf cas particulier) et n'importe quel itinéraire emprunté dès lors que la matière est transportée dans un emballage adéquat* ». ⁹⁷

Il existe toutefois des règles de circulation relatives aux matières dangereuses portant notamment sur les interdictions d'emprunter les tunnels. On notera également des caractéristiques comme le poids ou la vitesse qui interdisent le passage par certains ouvrages ou types de voies (notamment dans le cas des châteaux de combustible irradié).

Dans le cadre des matières nucléaires et de leur protection physique, il existe des « itinéraires agréés ». Ils sont agréés par le ministère de l'Industrie et surveillés lors du transport par l'EOT (Échelon Opérationnel des Transports) de l'IRSN. Il peut s'agir de parcours habituellement empruntés ou de trajets ponctuels. Les itinéraires sont précisés dans les « préavis » (voir ci-dessous). Ils couvrent l'ensemble du transport – y compris les gîtes d'étape, etc. Les transports de catégories I et II (voir Annexe 3) doivent demeurer sous la surveillance constante des équipages pendant les arrêts de courte durée, et stationner la nuit dans un établissement fermé, gardé et agréé. La notion même d'agrément est couverte par le secret, et il ne nous a pas été possible d'en connaître les critères ⁹⁸.

Le préavis de transport et le suivi opérationnel sont partagés entre plusieurs administrations. Le ministère des Transports n'est pas systématiquement averti des transports de matières radioactives. Dans le cas des colis de matières fissiles, des colis de type B(M) et certains colis de type B(U) ⁹⁹, l'expédition fait l'objet d'un avis préalable adressé par l'expéditeur au ministère de l'Intérieur (Direction de la Sécurité Civile), qui prévient les préfets et les services concernés (secours, force de l'ordre, etc.). C'est le cas pour tous les transports étudiés ici.

Tout transport de matières nucléaires fait l'objet d'un préavis de transport soumis à l'EOT. Il est adressé 15 jours avant le transport. Il permet de vérifier que l'itinéraire et les dispositions sont conformes à ceux qui ont été données dans le cadre de l'autorisation, que les itinéraires donnés sont bien ceux agréés par le ministère de l'Industrie, que les formations des chauffeurs sont bien conformes aux dispositions réglementaires. Le préavis est confirmé par le transporteur trois jours avant le départ.

Un accord préalable doit être délivré par l'autorité compétente pour tous les transports des matières de classe I ou II. Celle-ci peut modifier les conditions d'exécutions du transport ou renforcer les mesures de protection, voire suspendre le mouvement, si les circonstances particulières l'exigent.

Dans l'ensemble de ces dispositifs, la réglementation ne semble prévoir à aucun moment l'information des élus locaux, et notamment des maires, que le passage d'un transport de ce type sur leur commune concernent pourtant au premier chef.

Pour tout transport de matières de la catégorie I, une protection particulière doit être assurée par une escorte, à la charge du transporteur ; le ministre de l'Intérieur décide, le cas échéant la participation de la

⁹⁷ Claude Ringot et Jacques Lombard, Département de Sûreté des matières radioactives, IPSN, dans *Clefs-CEA*, n°25, hiver 1992.

⁹⁸ SPCMN, Ministère de l'Industrie, des Postes et des Télécommunications et du Commerce Extérieur, Rapport sur l'application des dispositions de la loi n°80-572 du 25 juillet 1980 sur la protection et le contrôle des matières nucléaires, 1993.

⁹⁹ Sont concernés ici les colis de type B(U) contenant des matières radioactives ayant une activité supérieure à la plus faible des valeurs ci-après : 3.000 A1 ou 3.000 A2 ou suivant le cas 1.000 TBq (voir Annexe 5 pour les valeurs A1 et A2).

force publique à cette escorte. L'escorte doit être munie d'un ou plusieurs véhicules indépendants du véhicule de transport des matières nucléaires et disposer d'un moyen de communication avec celui-ci.

Les membres de cette escorte doivent être formés afin d'accompagner le transport en diminuant les chances d'un accident tout en augmentant la sûreté des matières transportées. Ceci n'est pas toujours le cas. Ainsi le dossier transport des matières dangereuses de la CFDT de 1985 notait un accident lors d'un transport d'oxyde de plutonium en poudre qui n'aurait sûrement pas eu lieu sans escorte. Un motard de l'escorte a voulu ouvrir la voie au transport de plutonium sur une route prioritaire, mais n'a pas été vu par un véhicule. Le camion transportant le plutonium a été au fossé, mais l'accident serait resté sans conséquences radiologiques. De plus, les motards auraient été affolés, ne sachant évaluer la gravité de l'accident¹⁰⁰.

En 1994, dans le contexte des « *problèmes posés par la généralisation du MOX* », le député Claude Birraux notait en particulier « *pour le combustible neuf, la présence de plutonium dans les assemblages combustibles "en quantité suffisante" entraîne le classement du colis dans la catégorie I au regard de la réglementation sur la protection physique des matières nucléaires. Il en résulte que chaque transport doit recevoir l'accord de l'autorité compétente, faire l'objet d'un suivi par l'EOT de l'IPSN, et se soumettre à toutes les exigences de cette réglementation. Ces contraintes certaines qui sont imposées à EDF pour les transports actuellement pratiqués (...) seront peut-être l'objet de négociations pour éventuellement alléger les obligations pesant sur le transport de combustible neuf lorsque son usage se généralisera* »¹⁰¹. La question qui se pose est de savoir si les contraintes supplémentaires liées à la généralisation du MOX conduisent à un affaiblissement des mesures de suivi et de contrôle, et éventuellement à une baisse du niveau de sûreté et à une augmentation des risques de prolifération.

L'agrément du ministère des Transports est requis pour tous les colis contenant des matières fissiles, ainsi que les colis de type B, B(U) et B(M). Ils doivent correspondre entre autres aux spécifications présentées dans l'Annexe 5. Il faut toutefois savoir que la réglementation sur le transport des matières dangereuses prévoit des transports par arrangement spécial : il s'agit de dispositions, approuvées par l'autorité compétente en vertu desquelles un envoi qui ne satisfait pas toutes les prescriptions applicables peut être transporté. Ces « dérogations » peuvent porter sur : l'emballage ou le colis, l'intensité maximale de rayonnement, la contamination sur les colis, les véhicules, les conteneurs, les citernes et les sur emballages, l'emballage et les chargements « en commun ».

Pour les transports que nous étudions, il existe des transports sous arrangement spécial, portant notamment, selon les autorités, sur l'agrément des colis. Selon une déclaration de 1995 du directeur de la Mission du Transport des Matières Dangereuses au ministère des Transports, « *quand le règlement ne peut pas être respecté, il y a des dérogations sur des points très techniques aux dispositions du règlement. Les dérogations portent sur les conditions d'emballage, les essais, etc. (...) Globalement, la sûreté est équivalente, mais pas conforme à la lettre. (...) La difficulté, c'est qu'il y a une très grande variété d'emballages, et sans arrêt des modifications de conteneurs et de contenus* ».¹⁰² La pratique des dérogations est particulièrement risquée dans un domaine où il n'y a pas de droit à l'erreur.

Il n'y a pas d'agrément des entreprises de transport délivré par le ministère des Transports. Les entreprises effectuant des transports de matières dangereuses sont soumises à une certification¹⁰³. Les chauffeurs doivent suivre une formation spécifique de cinq jours dispensée par l'INSTN (Institut National des Sciences et des Techniques Nucléaires) à l'issue de laquelle leur est délivrée une attestation valable cinq ans.

¹⁰⁰ Confédération Fédérale Des Travailleurs (CFDT), « *Accident de transport de matières radioactives par route, compte-rendu du CHS de Marcoule du 2 avril 1980* », annexe 5 du dossier transports des matières dangereuses, septembre 1985.

¹⁰¹ C. Birraux, *Rapport sur le contrôle de la sûreté et la sécurité des installations nucléaires*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), Assemblée nationale, 1994.

¹⁰² Entretien téléphonique avec François Barthélemy, directeur de la Mission du Transport des Matières Dangereuses, Ministère des Transports, 6 mai 1995.

¹⁰³ Arrêté du 1er juin 2001 relatif au transport des marchandises dangereuses par route (dit arrêté ADR).

Actuellement en France, pour les matières nucléaires les plus sensibles (Catégorie I, donc dans le cas de la présente étude, le combustible MOX et l'oxyde de plutonium), seules deux autorisations de transport ont été délivrées par le ministère de l'Industrie : à COGEMA et à Transnucléaire – aujourd'hui COGEMA Logistics –, ainsi qu'à la société allemande NCS avec l'appui, lors des transports en territoire français, de Transnucléaire.

Il est possible pour les transporteurs autorisés de recourir à des sous-traitants préalablement agréés par le SPCMN pour les transports de combustibles irradiés et de matières nucléaires classées en catégorie III. Ainsi, au 31 décembre 1993, les sous-traitants de Transnucléaire étaient au nombre de 63 (transporteurs terrestres, compagnies maritimes et aériennes, SNCF) dont 14 pour le transport de combustibles irradiés¹⁰⁴. On notera en particulier que « pour les transports utilisant le réseau de la SNCF, cette dernière intervient en tant que sous-traitant agréé des transporteurs autorisés au titre de la loi ».

Il existe une procédure d'agrément des moyens de transport dans le cadre de la réglementation pour le transport de matières dangereuses. Par ailleurs, les moyens utilisés pour le transport des matières nucléaires de catégories I et II, combustibles irradiés inclus, doivent être agréés par le ministère de l'Industrie. Les prescriptions techniques ont été édictées par le SPCMN, qui notait en particulier dans son rapport annuel 1993 : « en raison de la nécessaire confidentialité à laquelle sont soumises ces prescriptions techniques, le détail de leur nature et de leur contenu ne peut être exposé dans le présent rapport »¹⁰⁵. On notera en outre, que suite à ses inspections, le SPCMN a pris la décision de mettre en place un dispositif complémentaire d'inspection technique des véhicules de transport des matières nucléaires des catégories I et II non irradiés.

Le transport par voie ferrée des matières I et II non irradiées est interdit, pour des raisons de protection physique. Il est évident que l'organisation d'une escorte sur voie ferrée est quelque peu difficile et la flexibilité moindre. Pour les cas que couvre ce rapport, il convient donc de souligner que le transport par train de plutonium séparé et de MOX non irradié est interdit ; seuls les transports ferroviaires de combustibles irradiés sont autorisés.

4.2.2. Les communes face au transport de matières radioactives

Les maires ne sont pas nécessairement informés du passage des matières radioactives (et encore moins des matières classées nucléaires) sur le territoire de leur commune. Du point de vue de la réglementation sur le transport des matières dangereuses, rien ne l'exige.

Du point de vue de la protection physique, le plus grand secret est de rigueur. On apprend par exemple dans le rapport annuel 1993 du SPCMN que « à la demande des experts français, soutenus en cela par d'autres délégations (japonaise notamment), des recommandations afférentes à la confidentialité des transports ont été introduites dans l'INFCIRC/225¹⁰⁶ (...) :

« Les objectifs de la protection physique seront plus facilement atteints (...) en ne communiquant d'informations préalables sur le transport qu'au plus petit nombre de personnes ». (...)

« Des mesures appropriées, conformes aux prescriptions nationales, devraient être prises pour protéger le caractère confidentiel des informations concernant les opérations de transport, y compris les renseignements détaillés sur l'horaire et l'itinéraire et le transport des matières des catégories I et II devrait faire l'objet d'une attention particulière ».

Les transports de matières nucléaires ne bénéficieraient cependant pas de dérogation concernant l'étiquetage et le placardage¹⁰⁷ des véhicules, et il n'y existerait pas de transport banalisé.

Alors que certaines dispositions de la protection des matières nucléaires peuvent légitimement être considérées comme venant renforcer la sûreté des transports, ceci peut certainement être remis en cause lorsque l'on fait systématiquement appel à la loi du silence.

¹⁰⁴ SPCMN, *op. cit.*

¹⁰⁵ SPCMN, *op. cit.*

¹⁰⁶ INFCIRC/225/AIEA : Recommandations de l'AIEA sur la protection physique des matières nucléaires.

¹⁰⁷ Imposés par la réglementation sur le transport des matières dangereuses.

Le Code des Communes, par son article L.131-2 assigne au maire le soin de veiller « *au bon ordre* », à la « *sûreté* », à la « *sécurité et à la tranquillité publique* ». ¹⁰⁸

Par ailleurs, la « loi Barnier » ¹⁰⁹ introduit dans son article premier le « *principe de précaution, selon lequel l'absence de certitude, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économique acceptable* » et le « *principe d'action préventive et de correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable* ».

Il est évident qu'afin de remplir son devoir de protection, vis-à-vis de ses administrés, un maire peut estimer qu'il est plus prudent d'interdire les transports de matières dangereuses et en particulier radioactives et/ou nucléaires. Un tel raisonnement semble d'autant plus plausible que les données dont disposent les élus locaux ne leur offrent pas un niveau d'information suffisant.

Quelles sont alors les possibilités d'interdiction de transport de matières radioactives et nucléaires au niveau local ? Le code des communes (article L.131-4-2.) prévoit que : « *Le maire peut, par arrêté motivé, interdire l'accès de certaines voies ou de certaines portions de voie aux véhicules de transport de matières dangereuses visées par la directive européenne du 24 juin 1982 et de nature à compromettre la sécurité publique.* » S'il est vrai que les matières radioactives ne sont pas à l'origine « visées » par cette directive, selon un avis recueilli en 1995 auprès de Raphaël Romi, professeur agrégé de droit public à l'Université de Nantes, il est tout à fait justifiable qu'elles le soient par extension, le pouvoir d'adaptation étant par exemple justifié par l'évolution des circonstances ¹¹⁰.

L'interdiction des seules matières radioactives n'est pas « prévue » en terme de signalisation routière ; il n'existe en effet dans le code de la route que des panneaux d'interdiction pour les matières dangereuses (dans leur totalité), les matières explosives, et les matières susceptibles de polluer les eaux. Ceci ne présente cependant pas une réelle difficulté, car toujours selon Raphaël Romi, « *on peut inventer la signalisation, la publicité d'un arrêté peut se faire tout simplement par voie de pancarte* ».

Il convient de rappeler que les arrêtés doivent évidemment respecter certaines règles et peuvent se heurter à certaines difficultés. En effet, ils peuvent être annulés par le tribunal administratif, soit parce qu'ils ne sont pas considérés comme suffisamment motivés, soit parce qu'ils apparaissent comme de simples déviations vers une ou plusieurs autres communes ou qu'il n'existe pas d'itinéraire de remplacement. Il ne peut, en tout état de cause, s'agir d'interdiction totale sur l'ensemble d'une commune, car il existe un refus de principe aux interdictions générales et absolues. Enfin, sur les routes à grandes circulations, il existe, sur le territoire de la commune, une « concurrence » entre le pouvoir de police du maire et la compétence du préfet.

Les pouvoirs de police du maire doivent donc pouvoir être étendus aux matières radioactives. Les élus locaux peuvent engager des actions visant à faire préciser, respecter, voire renforcer, ce droit, et utiliser les mesures et les moyens qui leur permettent d'interdire à un transport de matières radioactives d'emprunter les voies de leur commune ou de stationner sur son territoire s'ils jugent que la sûreté, la sécurité et la salubrité publiques ne sont pas assurées. Il ne s'agit pas a priori d'une initiative conflictuelle. Il existe, dans le cas d'agglomération, des initiatives de concertation entre élus et préfets.

Dans un premier temps, les élus locaux pourraient demander à être systématiquement informés du passage de matières radioactives qui font l'objet d'un avis ou préavis de transport (aussi bien dans le cadre du transport de matières radioactives que dans le cadre de la protection physique), des itinéraires empruntés ainsi que, le cas échéant, d'un éventuel gîte d'étape sur le territoire de la commune.

Il faudrait par la suite repérer les parcours et dresser l'inventaire des passages particuliers présentant des dangers spécifiques soit en terme de risque d'accident soit en terme de conséquences : ponts, proximité des réservoirs d'eau de la ville, carrefours dangereux et autres « points noirs », etc.

¹⁰⁸ Raphaël Romi, *Droit et administration de l'environnement*, Montchrestien, 1994.

¹⁰⁹ Loi n°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, JO du 3 février 1995.

¹¹⁰ Raphaël Romi, communication personnelle, 6 juin 1995.

Nous avons relevé par exemple un cas de transport de matières dangereuses ayant fait une chute de 30 mètres en contrebas¹¹¹ alors que les prescriptions pour les colis de matières radioactives concernent une chute de 9 mètres sur cible indéformable.

Il ne faut pas oublier que les statistiques générales sur les accidents de transport de matières dangereuses montrent que ceux-ci surviennent dans la majorité des cas en ligne droite, sur terrain plat, par temps normal, et donc que le risque d'accident ne peut être écarté à aucun point du parcours. De plus, le véhicule de transport de matières dangereuses est souvent seul impliqué ou mis en cause dans l'accident. On ne peut se contenter de prendre uniquement en compte les caractéristiques des voies et les risques présentés par les autres usagers de la route.

Le cas échéant, il s'agit ensuite d'analyser finement les mesures en place ou à mettre en place pour répondre à un accident de matières radioactives sur le territoire de la commune ou à tout autre endroit pouvant avoir un impact immédiat ou non sur la santé des populations. L'organisation des secours ne pourra en aucun cas se faire sans l'implication des pouvoirs locaux.

Nous rappellerons que l'article premier de la « Loi Barnier » déjà mentionnée, pose également le « principe de participation, selon lequel chaque citoyen doit avoir accès aux informations relatives à l'environnement, y compris celles relatives aux substances et activités dangereuses ».

4.3. Accidents de transport

4.3.1. Prévention et situations d'accidents

• Application de l'échelle INES

Lorsqu'un événement survient dans une installation nucléaire, ou cours d'une opération de transport, il est qualifié d'incident ou d'accident en fonction de sa gravité et de ses conséquences sur les populations et l'environnement.

Pour mesurer la gravité d'un événement, une échelle internationale existe : l'échelle INES – International Nuclear Event Scale. L'échelle INES (International Nuclear Event Scale), graduée de 0 à 7, définit la gravité relative d'un événement et le caractérise, en fonction des rejets radioactifs et du degré de dégradation d'une ou plusieurs des fonctions de sûreté, selon les niveaux illustrés par le Tableau 28.

Tableau 28 L'échelle INES (International Nuclear Event Scale) applicable aux accidents de transports de matières nucléaires

Qualification des événements	Niveau
Accident	7 Accident majeur
	6 Accident grave
	5 Accident
	4 Accident
Incident	3 Incident grave
	2 Incident
	1 Anomalie
Ecart	0 Ecart

Source : Autorité de sûreté nucléaire, 2002

¹¹¹ Accident survenu à Serrière (07) le 16 mai 1989. Voir Mission du Transport des Matières Dangereuses (MTMD), *Statistiques sur les Matières Dangereuses 1989 – Accidents et incidents concernant le transport par voies routière et ferroviaire des matières dangereuses*, éd. 1989.

Alors que l'application de l'échelle INES aux installations nucléaires se fonde sur trois types de critères qui sont les conséquences à l'extérieur du site, les conséquences à l'intérieur du site et la dégradation de la défense en profondeur, en ce qui concerne les transports des matières radioactives ayant lieu sur la voie publique, seuls les critères incidence hors site et dégradation de la défense en profondeur sont à prendre en compte. Enfin, le cas de la perte d'un colis est traité comme une perte de source, conformément aux indications définies dans le manuel d'utilisation de l'échelle INES.

• Modalité des plans d'urgence

En cas d'échec de la prévention, le plan d'urgence est une réponse au développement possible d'un risque ou d'un groupe de risques précis dans le cas particulier de transport de matières radioactives, afin d'en limiter les conséquences¹¹². Il recense les mesures à prendre et les moyens susceptibles d'être mis en œuvre en fonction d'une évaluation a priori des risques potentiels.

Différents acteurs interviennent en cas d'événements, notamment : le Préfet, qui est chargé de l'organisation de la gestion de l'accident (loi du 22 juillet 1987 et décret du 6 mai 1988), et la DGSNR, qui apporte son concours, en concertation avec le ministère de la santé et l'IRSN.

Le préfet territorialement compétent est le responsable de l'organisation de terrain. Après consultation et avis des organismes nationaux compétents (notamment l'Autorité de sûreté nucléaire), c'est lui qui décide des actions visant à protéger la population des conséquences d'un accident intervenant sur l'itinéraire d'un transport de matières radioactives et/ou nucléaires. C'est lui qui décide de mettre en œuvre le plan particulier d'intervention (PPI) prévu pour faire face aux situations de crise.

La première étape est la mise en place d'une structure de crise composée d'un Poste de Commandement Fixe (PCF) et d'un Poste de Commandement opérationnel (PCO). Le PCF, situé en général à la préfecture, s'articule autour du préfet qui en est le décideur. Le PCF est donc le centre de décision des actions de terrain.

Pour la gestion de crise, le préfet s'appuie sur des cellules dédiées. Sur le terrain, au plus près de la zone affectée mais en dehors de celle-ci, le PCO est mis en place pour remplir les missions décidées par le préfet. Son responsable, interlocuteur du préfet sur le terrain, est généralement le sous-préfet de l'arrondissement dans lequel se trouve l'installation. Le PCO se subdivise en trois composantes : le poste de commandement et de gestion des moyens (PCM), la cellule « liaison élus » et le centre de presse de proximité.

Le PCM regroupe les services opérationnels (pompiers, gendarmerie, police, SAMU...). Il est chargé de la coordination et de la gestion de l'ensemble des interventions, comme les mesures de radioactivité près du lieu de l'accident, le contrôle de l'accès des zones menacées, l'alerte des populations par le biais des équipements mobiles de diffusion de l'alerte en complément des sirènes. La cellule « liaison élus » constitue une liaison forte et communique avec les cellules de crise mises en place par les communes concernées. Le centre de presse de proximité est chargé des relations avec les médias sur le terrain et de la communication dite « de proximité ». Le préfet de son côté assure, depuis la préfecture, la conduite de la communication avec les autres médias et de l'information des populations.

L'organisation de la sécurité publique repose sur les pouvoirs de police du maire également. Le Code général des collectivités territoriales dispose que « *le maire est chargé sous le contrôle administratif du représentant de l'Etat, de la police municipale* » (L.2212-1), et que celle-ci a pour objet « *d'assurer le bon ordre, la sûreté et la sécurité publique* » (L.2212-2). Le maire est par ailleurs consulté, lors de l'élaboration de certains plans d'urgence. Enfin, lorsque le maire n'est plus en mesure d'assurer ses responsabilités, faute de moyens ou en raison de la gravité de la situation, il doit faire appel au représentant de l'Etat dans le département.

¹¹² Danan Y. M., Decelles S., Morel J-P., *Transport de marchandises dangereuses*, Direction de la Prévention des Risques Majeurs, Bureau de l'Information et de la Coordination Interministérielle, 1999.

4.3.2. Les régimes de responsabilité civile applicables en cas d'accident

• Modalités de mise en œuvre de la responsabilité civile

L'ensemble des composantes du dispositif de sûreté (résistance et fiabilité des emballages de transport spécifiques et/ou des moyens de transport spécialement affrétés) est censé offrir une protection contre les risques d'accidents. Si un accident se produisait néanmoins, les préjudices subis pourraient être indemnisés en application des différents régimes de responsabilité civile existants.

Dans le cas d'un accident sans conséquence nucléaire, c'est le régime de responsabilité civile de droit commun qui serait mis en œuvre. Dans l'hypothèse d'un accident nucléaire, le régime conventionnel de responsabilité civile nucléaire établi par les Conventions de Paris et de Bruxelles serait appliqué. En vertu de ce régime, une personne subissant un dommage résultant des propriétés radioactives des matières transportées pourrait demander réparation de son préjudice sans qu'il lui soit nécessaire de démontrer l'existence d'une faute.

Ces conventions introduisent un principe de couverture de la responsabilité par un système d'assurance. Un accident nucléaire affectant le territoire d'Etats non parties à ces conventions, eaux territoriales comprises, serait traité selon le régime de responsabilité civile applicable au regard des règles de droit international privé.

• Modalités de l'assurance du transport des marchandises dangereuses¹¹³

Dans l'optique spécialisée de l'assurance « transports », la vision de l'assureur se limite au produit transporté et lui seul. Les dommages ou préjudices causés par la marchandise sinistrée aux tiers ou à l'environnement sont en effet du domaine de l'assurance de la responsabilité civile délictuelle ou quasi-délictuelle qui n'est pas traitée de manière traditionnelle par les branches transports des compagnies et des courtiers.

Le principe directeur qui régit l'assurance des matières radioactives et/ou nucléaires transportées est qu'il ne peut y avoir de garantie sur la marchandise que si celle-ci est conditionnée, manutentionnée, transportée, stockée dans les strictes conditions spécialement prévues par les conventions, lois et règlements qui lui sont applicables.

Il existe une particularité du droit français qui prévoit en transport national une indemnisation pour les dommages immatériels en plus des dommages matériels. Cette situation concerne deux contrats-type : le contrat type « général » avec un plafond peu élevé par tonne de chargement, mais qui incorpore dommages matériels et immatériels ; et le contrat type « citernes », qui prévoit une limite spécifique d'indemnisation environ 15 fois plus élevée. Cette police spécifique est valable pour le cas d'une entreprise spécialisée dans le transport de produits nucléaires, où les prestataires spécialisés ne sont pas nombreux.

4.4. Conclusions sur la réglementation applicable

Les transports contenant du plutonium sont soumis simultanément à deux corps principaux de réglementation, répondant à deux objectifs. Du point de vue de la sûreté, les transports des matières radioactives en général sont soumis à la réglementation sur le transport des matières dangereuses. Du point de vue de la prolifération, les matières dites matières nucléaires, sont soumises à la législation sur le contrôle et la protection physique, relative à la prévention des pertes, disparitions, vols et détournement pour éviter l'utilisation de ces matières à des fins militaires ou terroristes.

La sûreté repose sur trois « lignes de défense », qui sont respectivement l'emballage, la fiabilité des moyens de transport, et l'efficacité des moyens d'intervention mis en œuvre face à un accident ou un incident afin d'en prévenir les conséquences. En pratique, l'approche de la sûreté des transports repose essentiellement sur la garantie de l'intégrité de l'emballage. Des réglementations différentes s'appliquent aux différents types de transports, mais les critères de résistance des colis sont appliqués uniformément à toutes les voies de transport.

¹¹³ Dussueil J., *L'assurance transport des marchandises dangereuses*, mars 1999, www.marsh.fr

Les normes de performance des colis utilisés pour le transport des matières nucléaires distinguent les situations de routine, les conditions dites « normales » (incidents et accidents mineurs) et les conditions « accidentelles » de transport. Celles-ci intègrent la résistance au choc (chute de 9 m sur une surface indéformable, et chute de 1 m sur une barre métallique), la résistance à l'incendie (feu enveloppant d'hydrocarbure de 30 minutes à 800°C), et la résistance à l'immersion (sous 15 m d'eau pendant 8 heures et sous 200 m d'eau pendant 1 heure). La sûreté des transports en situation accidentelle tient entièrement dans le principe, hautement discutable, que cette série de critères permet de décrire l'ensemble des situations accidentelles possibles.

Dans le domaine de la sécurité, la protection contre le vol et le détournement de matières contenant du plutonium impose en particulier aux détenteurs et transporteurs de mettre en place des mesures destinées à assurer la protection des matières qu'ils détiennent ou transportent. Ces dispositions impliquent en particulier la protection par une escorte des transports de plutonium séparé, ou incorporé à du combustible MOX non irradié. Aussi, le transport par train de plutonium sous forme de poudre d'oxyde, et de MOX non irradié est interdit ; seuls les transports ferroviaires de combustibles irradiés sont autorisés.

Bien que les transports de plutonium exposent à des risques les populations sur le long de leur parcours, la réglementation ne prévoit aucune obligation d'information des maires du passage sur le territoire de leur commune de tels transports. De plus, un maire qui voudrait, pour la protection de ses administrés, interdire les transports de plutonium sur sa commune ne dispose pas explicitement des pouvoirs de police pour le faire.