

Les combustibles MOX d'EDF, production et stockages, bilans 2011

André Guillemette, Jean-Claude Zerbib

L'introduction progressive du combustible à oxyde mixte d'uranium et de plutonium (appelé « MOX », pour Mixed OXYde) dans les réacteurs REP d'EDF, qui utilisaient jusqu'en 1987 exclusivement du combustible à oxyde d'uranium enrichi « UO₂ », est souvent présentée comme une substitution « positive » qui permet d'une part de faire des économies en uranium naturel et en unités de séparation et d'autre part de recycler le plutonium extrait lors du retraitement des combustibles UO₂ « usés ».

Nous allons examiner, suivant plusieurs critères (activités totales des radionucléides produits, émission neutronique, toxicité, thermique des piscines de stockage en fonction du temps de refroidissement) les implications de ce choix, par référence à celles de la filière classique des combustibles à uranium enrichi, afin de quantifier les différences.

Résumé

Pour un taux de combustion identique de 45 GWj par tonne d'uranium initial¹ (t_{MLi}), et après trois ans de refroidissement en sortie de réacteur, nous pouvons comparer les deux types de combustibles usés UO₂ et MOX, en prenant en compte plusieurs paramètres :

Les masses et les activités des transuraniens

Le combustible MOX, utilisé dans 21 des réacteurs de 900 MWe, parmi les plus anciens du parc de 58 réacteurs nucléaires d'EDF, est en masse, 6 fois plus chargé en plutonium (notamment ²³⁸Pu et en ²⁴⁰Pu) et en terme d'activité 8 fois plus radioactif qu'un combustible UO₂ usé enrichi à 3,7 % en ²³⁵U. Le MOX « usé », a une masse de curium² (notamment ²⁴⁴Cm) douze fois plus grande que celle du combustible UO₂ usé.

La masse de plutonium total décroît de 23 %, passant de 86,5 kg/t_{MLi} dans le Mox neuf à 66,6 kg/t_{MLi} dans le combustible MOX usé tandis qu'il s'est formé 6 kg/t_{MLi} d'actinides mineurs³ contre 1,24 kg/t_{MLi} dans un combustible UO₂ usé, soit une augmentation d'un facteur 4,9 de la masse des actinides. En termes d'activité, celle des actinides mineurs est 10,8 fois plus importante dans le MOX usé que dans le combustible UO₂ usé.

La somme des activités du plutonium et des actinides mineurs, dans le combustible MOX usé, est multipliée par 8,1 par rapport à celle d'un combustible UO₂ usé. C'est cet indicateur qui conditionne l'énergie thermique dégagée par les différents combustibles.

1 - Les tonnages de combustibles habituellement considérés, concernent les seuls matériaux combustibles nucléaires, dénommés « métal lourd initial » (MLi).

2 - Le combustible usé renferme cinq isotopes radioactifs du curium (²⁴²Cm, ²⁴³Cm, ²⁴⁴Cm, ²⁴⁵Cm et ²⁴⁶Cm). Ces cinq radionucléides, émetteurs alpha, sont le siège de fissions spontanées. Le ²⁴⁴Cm (T_{1/2} = 18,1 ans) est l'isotope dont l'activité, largement dominante, est environ 100 fois supérieure à celle des isotopes 242 et 243. Ses fissions spontanées entraînent la production de radionucléides comme l'iode 131 par exemple alors même que, l'activité de l'¹³¹I produite par la fission de l'uranium 235 et des plutoniums 239 et 241, a totalement disparu après 3 années de refroidissement.

3 - De manière usuelle, les isotopes créés par activation neutronique des isotopes de l'uranium, sont qualifiés de « mineurs » s'ils ne sont pas « fissiles ». Comme ces isotopes se trouvent, dans la classification périodique des éléments, placés dans la famille des actinides, ils sont désignés comme étant des actinides mineurs.

L'émission neutronique

Pour un même taux de combustion, 27 ans après (10^4 jours) le déchargement du cœur, les combustibles MOX usés ont une activité neutronique *10 fois plus importante que celle des combustibles usés UO_2* [AEN OCDE 2006].

La toxicité radiologique potentielle

La toxicité principale des radionucléides formés dans le combustible usé est présentée par les radionucléides émetteurs alpha (plutoniums et actinides mineurs), qu'ils soient fissiles ou non.

Nous pouvons évaluer les toxicités potentielles de deux types de combustibles en comparant, dans l'hypothèse de l'incorporation dans l'organisme, par inhalation ou par ingestion d'une même quantité de matière, les doses respectives engagées.

En prenant pour indicateur l'activité de l'ensemble des émetteurs alpha présents dans les deux types de combustibles, à taux de combustion et à temps de refroidissement égaux, nous constatons que :

Dans le cas du MOX usé, la toxicité des plutoniums et des actinides mineurs est multipliée par un facteur 8,8 (inhalation comme ingestion) par référence à la toxicité de ces mêmes radionucléides dans les combustibles UO_2 usés.

Si l'on considère les activités respectives des actinides des MOX neuf et MOX usé, il résulte que la toxicité du MOX usé augmente de 84 % (ingestion) à 92 % (inhalation) par référence à la toxicité du MOX neuf.

Ces données contredisent l'affirmation d'AREVA selon laquelle « *Le recyclage diminue jusqu'à 10 fois la toxicité intrinsèque des déchets grâce au recyclage du plutonium* »⁴.

Le pouvoir calorifique

Les particules émises par les radionucléides abandonnent tout ou partie de l'énergie dans le combustible. Compte tenu de leur faible parcours dans la matière, les rayonnements alpha, bêta et les électrons sont totalement absorbés dans le combustible. Ainsi, les teneurs très élevées en plutonium et curium, principalement les ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu et ^{244}Pu , se traduisent par un pouvoir calorifique deux fois supérieur à celui des combustibles à uranium enrichi après 3 années de refroidissement, Mox : $9,6 \text{ kW/t}_{\text{MLi}}$ et UO_2 $4,7 \text{ kW/t}_{\text{MLi}}$.

Dans la période 10 à 50 ans de refroidissement, le pouvoir calorifique des MOX usés baisse d'un facteur 1,6, passant de 7,8 à $4,8 \text{ kW/t}_{\text{MLi}}$, celui des combustibles UO_2 usés baisse d'un facteur 2,3, passant de 2,7 à $1,2 \text{ kW/t}_{\text{MLi}}$.

Dans la période 100 à 300 ans de refroidissement ce pouvoir calorifique est encore 7 fois *supérieur* à celui des combustibles UO_2 .

Cette caractéristique thermique pénalisante rend l'entreposage des combustibles MOX en piscines de refroidissement beaucoup plus contraignant que celui des combustibles UO_2 (notamment en cas d'incident ou d'accident affectant les circuits de refroidissement).

Comme EDF n'envisage pas de retraiter la majorité du tonnage des MOX usés, le stockage définitif en profondeur est pénalisé par ce pouvoir calorifique résiduel.

La période d'entreposage des MOX usés, avant enfouissement définitif, sera plusieurs fois supérieure à celle des UO_2 usés (après 60 ans de refroidissement), ce qui entraîne une forte incidence sur le coût.

Notons que le report de l'enfouissement, avec un délai de plusieurs siècles, constituerait un legs aux générations futures qui pose un incontournable problème d'éthique.

Bilan 2011 du combustible MOX et du plutonium

Fin 2011 de l'ordre de 1 100 tonnes de combustibles MOX usés étaient entreposées en stockage de longue durée dans les piscines de l'usine AREVA NC de la Hague.

Aux 1 100 tonnes de combustibles MOX usés viennent s'ajouter 390 tonnes entreposées dans les piscines du bâtiment combustibles des réacteurs d'EDF, en attente de refroidissement intermédiaire (plus de 2,5 ans) avant d'être envoyées vers la Hague au rythme moyen actuel de 100 t/an. Enfin, dans 21 des réacteurs d'EDF, 300 tonnes sont en chargement.

Au tonnage des combustibles MOX usés⁵, il faut ajouter l'entreposage de l'ordre de 100 tonnes de rebuts de combustibles MOX non irradiés⁶ (provenant de l'usine Mélox d'AREVA), entreposés dans les installations de la Hague.

4 - Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'AREVA NC la Hague. Rapport 2010, page 11/48.

5 - EDF et AREVA ont convenu de ne pas retraiter le combustible Mox de 2007 à 2017.

6 - [WISE 2011] Yves Marignac, Le « cycle du combustible nucléaire français : analyse critique du bilan actuel. Notes du 15 juillet 2011.

Fin 2011 il y avait donc, à La Hague et dans les réacteurs EDF, un total de 1 490 t de MOX usés, 300 t partiellement usées et 100 t de MOX neuf rebutées⁷.

Entre 1998 et 2008, les usines de La Hague ont procédé à des campagnes de retraitement de combustibles MOX (de 5 à 31 t/an), mais la totalité des 68,5 tonnes de MOX retraitées sont des combustibles étrangers (Allemagne). *Aucun combustible MOX d'EDF n'a encore été retraité dans les usines de La Hague.*

Depuis 2007 et jusqu'en 2017, EDF est convenu avec AREVA de ne pas procéder au retraitement des combustibles MOX. Le flux de combustibles MOX usés étant maintenu, le tonnage entreposé à La Hague ira croissant (+110 t/an).

En dépit de l'affichage d'ouverture des études complémentaires de sûreté des principaux sites nucléaires après l'accident de Fukushima (mars 2011), nos recherches pour recueillir les données exploitants de cette étude et les croiser avec les données publiques accessibles, se sont heurtées à des fins de non recevoir des exploitants. Nous avons dû attendre fin 2011 pour accéder à des données partielles EDF... quant à AREVA, nous attendons toujours le bilan officiel des combustibles MOX entreposés⁸ dans ses piscines de la Hague.

Comparaisons des caractéristiques des combustibles UO₂ et Mox irradiés

Caractéristique	UO ₂ « usés »	MOX « usés »	Rapport MOX/UO ₂
Masse d'actinides	1,24 kg/t	6,04 kg/t	4,87
Activité des actinides	328 TBq/t	3 549 TBq/t	10,82
Masse de plutonium	11,21 kg/t	66,61 kg/t	5,94
Activité du plutonium	4 842 TBq/t	38 433 TBq/t	7,94
Masses (Pu + actinides)	12,45 kg/t	72,65 kg/t	5,84
Activités (Pu + actinides)	5 170 TBq/t	41 982 TBq/t	8,12
Dose par µg de métal lourd (ingestion)	0,12 mSv/µg	1,05 mSv/µg	8,75
Puissance thermique des produits de fission et d'activation	4,22 kW/t	4,58 kW/t	1,09
Puissance thermique des PF + PA + Pu + actinides	4,74 kW/t	9,64 kW/t	2,03
Puissance thermique des Pu + actinides	0,53 kW/t	5,06 kW/t	9,6

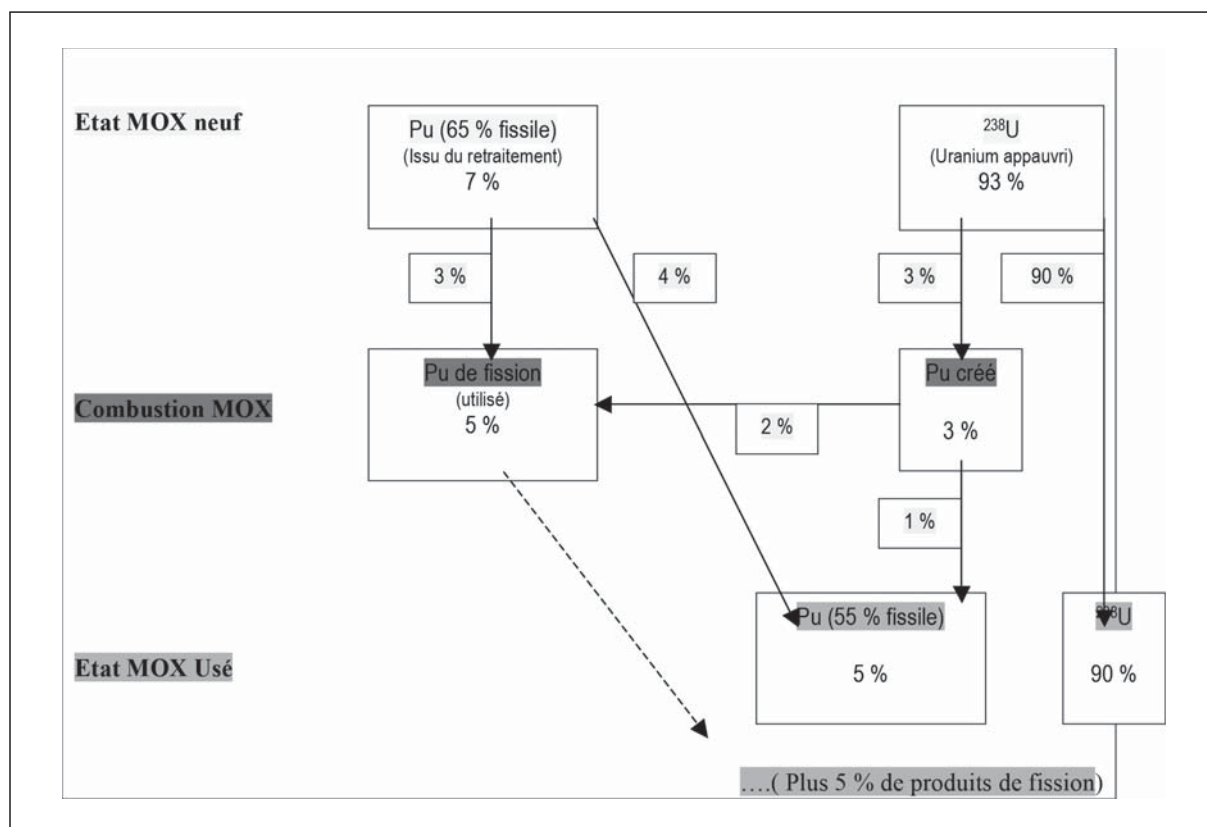
T = tonne de métal lourd, Taux de combustion = 45GW/t, Temps de refroidissement = 3 ans

Ce tableau récapitulatif montre que la pénalisation en termes de toxicité potentielle (facteur 8,8) ou d'énergie thermique (facteur 9,6) est liée à l'activité du plutonium résiduel (facteur 7,9) et aux actinides mineurs produits dans le combustible Mox usé (facteur 10,8).

7 - Ce bilan ne concerne que les usines de La Hague. Il ne prend pas en compte le plutonium présent à Mélox, aux diverses étapes de la fabrication (poudre, pastille, crayons, assemblages).

8 - AREVA La Hague publie tous les mois, depuis 30 ans, dans la presse locale, le chiffre détaillé de sa production en conteneurs de verres de produits vitrifiés et de produits solides compactés à vie longue, déchets ultimes du retraitement d'une partie des combustibles UO₂ usés. Cependant, les tonnages de combustibles retraités ou entreposés n'ont pas le même statut.

1 - Données génériques du combustible MOX



Le plutonium du combustible irradié est généralement transféré dans un combustible Mox « dès que possible » afin d'éviter le problème posé par le ^{241}Pu (demi-vie $T = 14,4$ ans), un émetteur bêta de faible énergie, qui se désintègre en ^{241}Am , un émetteur alpha de période longue ($T = 433$ ans). À la perte de cet isotope fissile du plutonium (^{241}Pu) s'ajoute donc la pénalité d'un isotope neutrophage (^{241}Am). La masse d' ^{241}Am générée dans le plutonium stocké augmente d'environ 0,5 % par an, avec une diminution correspondante de celle du plutonium fissile (^{241}Pu).

Un problème d'une autre nature est posé par le plutonium 238. Le ^{238}Pu ($T = 87,7$ ans) dans le plutonium stocké a une activité spécifique très élevée (276 fois supérieure à celle du ^{239}Pu) et constitue une source de neutrons spontanés. L'activité du ^{238}Pu produit dans le combustible UO_2 utilisé augmente linéairement avec le taux de combustion⁹.

Taux moyen de Pu dans les combustibles MOX,

La teneur moyenne en plutonium des combustibles MOX neufs a varié de 5,3 % à 7,08 %. Depuis 2007, le taux moyen est passé à 8,65 % de Pu pour équilibrer les taux de combustion UO_2 et MOX, et obtenir ainsi une gestion identique des deux types de combustible par $\frac{1}{4}$ de cœur.

La moyenne du taux de plutonium dans les combustibles MOX de 1987 à 2010 a été de 5,88 %.

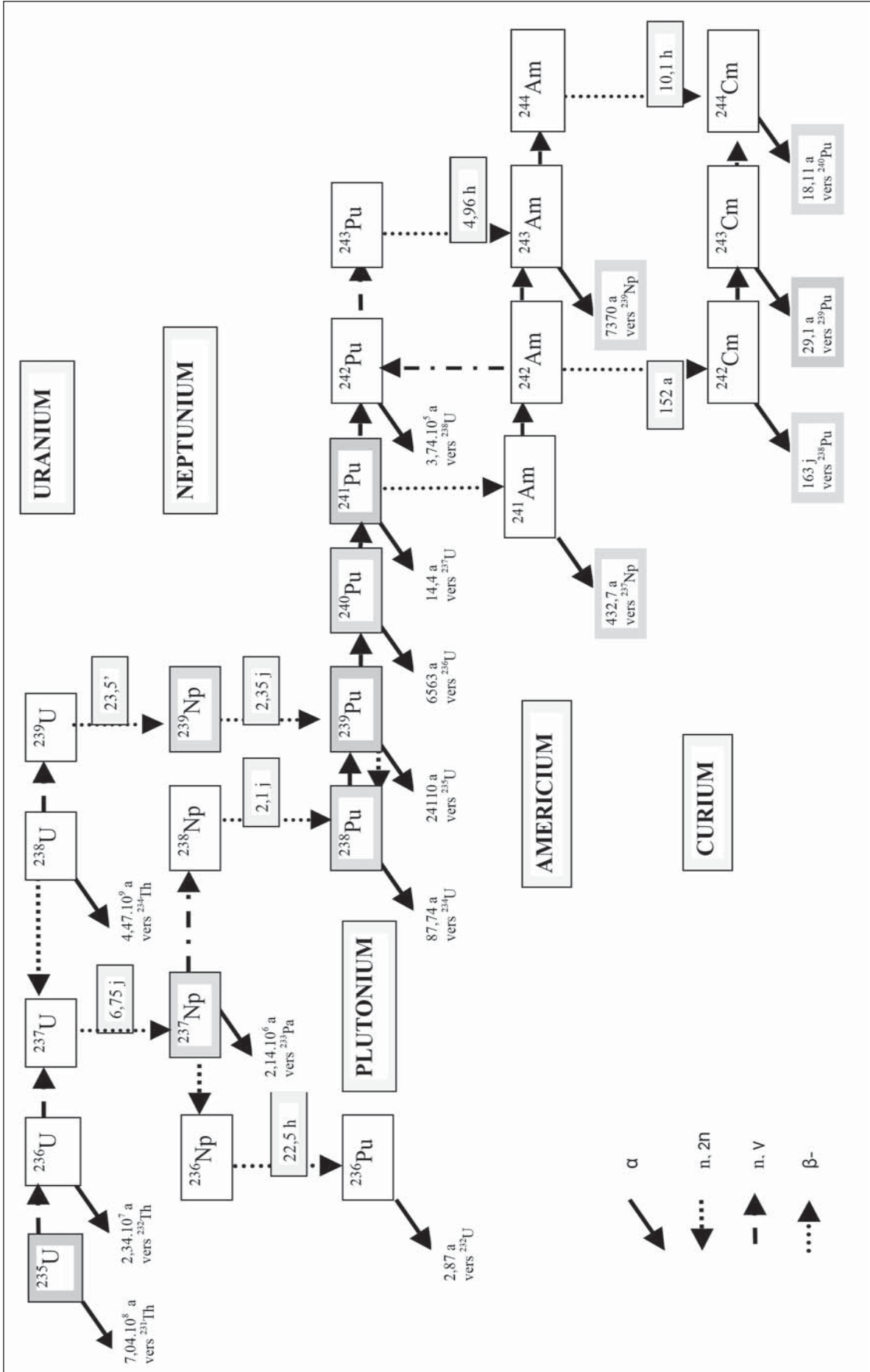
(3 500 assemblages pour 95 t de Pu recyclées, [EDF 2011])

2 - Comparaison des combustibles MOX et UO_2

2.1 - Rappel sur la chaîne des actinides issus de l'U et du Pu

Le schéma suivant décrit les chaînes radioactives des radionucléides, formés par activation dans les réacteurs, à partir des isotopes de l'uranium naturel. Les filiations en cascades de ces radionucléides, produisent par décroissance d'autres actinides émetteurs alpha de longues périodes. À ces activités, qui évoluent peu pendant plusieurs siècles, voire des millénaires, va correspondre la dissipation d'une énergie thermique persistante et faiblement décroissante.

⁹ - Source : site WNA (World Nuclear Association), août 2011.



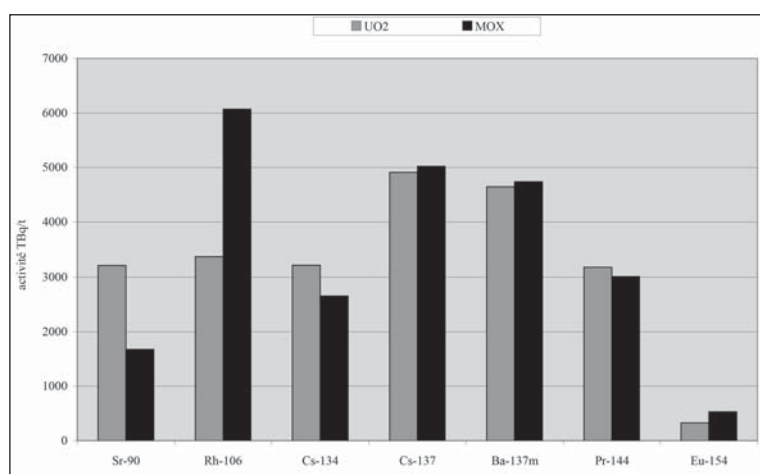
Sources : IN2P3 (CNRS) Institut national de physique nucléaire et de physique des particules et AREVA

Les actinides mineurs produisent par décroissance des isotopes du plutonium. Ainsi le ^{242}Cm (période 163 jours) devient par décroissance ^{238}Pu (période 87,74 ans), tandis que l'isotope le plus radioactif du curium produit dans le combustible, le ^{244}Cm (période 18,11 ans) devient par décroissance ^{240}Pu (période 6 563 ans). Ces deux filiations, citées pour exemple, montrent bien que par le jeu des décroissances, les substances résultantes vont rester hautement radioactives des milliers d'années. Il faut donc tenir compte de ces actinides dans tout bilan de masse, d'activité, de chaleur dégagée ou de radiotoxicité.

Les spectres des principaux produits de fission des combustibles UO_2 et MOX (majeurs par leur activité et leur chaleur résiduelle), usés au même taux de combustion et avec trois ans de refroidissement en sortie de réacteur sont à peu près identiques, voir figure n° 1.

Tenant compte de cette similitude des produits de fission, et de la forte réduction de l'activité des produits de fission (facteur voisin de 1000) trois cents ans après leur création, les bilans proposés dans cette note technique concernent les plutoniums et les actinides mineurs pour la radiotoxicité, et tous les radionucléides dans les bilans thermiques.

Figure n° 1 : Combustibles UO_2 et MOX usés à $45 \text{ GWj/t}_{\text{MLi}}$, activité des principaux produits de fission après trois ans de refroidissement



Sources : IRSN 2000 et IRSN 2012

2.2 - Caractéristiques radiologiques des combustibles UO_2 et MOX

Afin de comparer les masses et activités des substances radioactives présentes dans les deux types de combustibles usés, nous retenons les caractéristiques suivantes :

Taux de combustion $45 \text{ GWj/t}_{\text{MLi}}$, temps de refroidissement 3 ans ; UO_2 enrichissement initial en ^{235}U : 3,7 % ; MOX neuf taux de plutonium : 8,65 %

Pour ces caractéristiques de combustibles, nous pouvons faire les comparaisons suivantes :

2.2.1 - Masse et activité massique des plutoniums et des actinides mineurs présents dans les combustibles UO_2 et MOX usés

Tableau n° 1 : Teneurs comparées en plutonium, neptunium, américium et curium des combustibles UO_2 et MOX usés, après 3 ans de vieillissement

radionucléide	période (années)	UO_2 (3,7 % d' ^{235}U)		MOX (8,65 % de Pu)	
		masse (g/t _{MLi})	activité (TBq/t _{MLi})	masse (g/t _{MLi})	activité (TBq/t _{MLi})
^{236}Pu	2,87	$1,12 \cdot 10^{-3}$	0,022	$1,06 \cdot 10^{-4}$	0,021
^{238}Pu	87,7	335	208,8	2 741	1 710
^{239}Pu	24 065	5 914	13,4	26 063	59,1
^{240}Pu	6 537	2 885	23,5	19 995	163
^{241}Pu	14,4	1221	4196	9 702	36 500
^{242}Pu	$3,76 \cdot 10^5$	857	0,13	8 105	1,17
^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$	610	0,016	174	0,004
^{241}Am	432,7	284	36	2 620	332
^{242m}Am	152	1,3	0,46	42	15
^{243}Am	7 380	251	1,81	2041	14,7
^{242}Cm	0,45	0,26	31,33	2	275
^{243}Cm	28,5	0,77	1,33	13	21,5
^{244}Cm	18,1	86	256,5	964	2 890
Pu total		11 214	4 842	66 607	38 433
Pu total + actinides mineurs		12 452	5 170	72 647	41 982

Sources : Cogéma 1979, GRNC 2002, IRSN 2000 et IRSN 2012

Nous observons que les activités des isotopes du curium, qui sont le siège de fissions spontanées accompagnées d'émissions de neutrons, sont pour le MOX usé, 11 fois supérieures à celles produites dans le combustible UO_2 usé.

Le débit de fluence neutronique sera donc, à masse de combustible égale, 11 fois plus intense.

2.2.2 – Les isotopes du plutonium dans le MOX neuf fabriqué à partir des combustibles UO_2 45 GWj/t_{MLi} avec un refroidissement moyen de trois ans

Le temps de refroidissement moyen des combustibles retraités à la Hague est compris entre 6 et 10 ans.

Tableau n° 2 : Teneurs en masse et en activité des plutoniums dans les combustibles UO_2 usés, après 8 années de vieillissement, et dans les combustibles MOX neuf

radionucléide	période (années)	UO_2 « 3 ans »		UO_2 « 8 ans »			MOX neuf	
		masse (g/t _{MLi})	activité (TBq/t _{MLi})	K (décroissance)	masse (g/t _{MLi})	activité (TBq/t _{MLi})	masse (g/t _{MLi})	activité (TBq/t _{MLi})
^{236}Pu	2,85	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,022	0,296	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,0065	$2,64 \cdot 10^{-3}$	0,051
^{238}Pu	87,7	335	209	0,96	322	207	2543	1 586
^{239}Pu	24 065	5 914	13,4	1	5 914	13,4	46 671	106
^{240}Pu	6 537	2 885	23,5	1	2 885	23,5	22 811	186
^{241}Pu	14,4	1 221	4596	0,786	960	3 612	7 594	28 563
^{242}Pu	$3,76 \cdot 10^5$	859	0,12	1	859	0,12	6 792	0,95
Pu total		11 214	7704		10 940	6 712	86 500	30 442

Sources : Cogéma 1979, GRNC 2002, IRSN 2000 et IRSN 2012

2.2.3 - Les isotopes du plutonium et ceux des actinides mineurs dans les combustibles MOX neufs et dans les combustibles MOX usés

Le tableau N° 3 compare les masses et activités des combustibles MOX neuf et usés.

Tableau n° 3 : MOX neuf et MOX usé, 3 ans de vieillissement

radionucléide	période (années)	MOX neuf		MOX usé	
		masse	activité	masse	activité
		(g/t _{MLi})	(TBq/t _{MLi})	(g/t _{MLi})	(TBq/t _{MLi})
²³⁹ Pu	2,87	3,30.10 ⁻⁴	0,0065	1,06.10 ⁻⁴	0,021
²³⁸ Pu	87,7	2 543	1 586	2 741	1 710
²³⁹Pu	24 065	46 671	106	26 063	59,1
²⁴⁰ Pu	6 537	22 811	186	19 995	163
²⁴¹Pu	14,4	7 594	28 563	9 702	36 500
²⁴² Pu	3,76.10 ⁵	6 792	0,95	8 105	1,17
²³⁷ Np	2,14.10 ⁶			174	0,004
²⁴¹ Am	432,7			2 620	332
^{242m} Am	152			42	15
²⁴³ Am	7 380			2 041	14,7
²⁴² Cm	0,45			2	275
²⁴³ Cm	28,5			13	21,5
²⁴⁴ Cm	18,1			964	2 890
Pu total		86 500	30442	66 607	38 433

Sources : Cogéma 1979, GRNC 2002, IRSN 2000 et IRSN 2012

La masse des isotopes fissiles du plutonium (²³⁹Pu et ²⁴¹Pu), présents dans le combustible MOX usé, a décliné de plus d'un tiers par rapport au MOX neuf :

- ²³⁹Pu dans le MOX usé : 56 % du ²³⁹Pu initial (26,1 kg/t_{MLi} contre 46,7 kg/t_{MLi} dans le MOX neuf)
- ²³⁹ + ²⁴¹Pu dans le MOX usé : 65,9 % de ²³⁹ + ²⁴¹Pu initial (35,8 kg/t_{MLi} contre 54,3 kg/t_{MLi} dans le MOX neuf)

3 - Toxicité potentielle des plutoniums et des actinides mineurs dans les combustibles UO₂ et MOX

En supposant qu'un microgramme de métal lourd (1 µg) a été incorporé dans l'organisme, il est possible de calculer la dose engagée que chacun des radionucléides qu'il renferme délivreront en se répartissant dans les différents organes.

Pour chaque isotope présent dans ce µg de matière, qu'il s'agisse d'une incorporation par inhalation¹⁰ ou par ingestion, la fraction de dose engagée qu'il va occasionner est égale à :

Facteur de dose (Sv/Bq) x Activité du Pu dans le µg de métal lourd initial (Bq/µg) =

Fraction de dose engagée exprimée en Sv/µg

Les activités des produits de fission et des produits d'activation étant similaires, elles se traduisent, dans les calculs de dose potentielle, par des valeurs quasiment identiques en matière de radiotoxicité (voir tableau n° 5 en annexe).

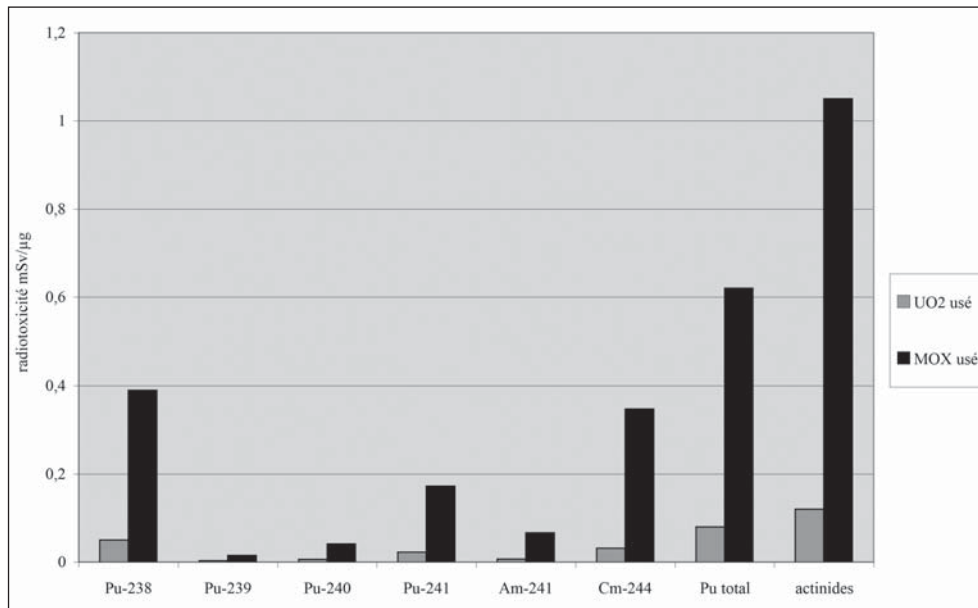
Dans la famille des actinides (période longue à très longue), cette radiotoxicité déjà prépondérante dans l'UO₂ usé initial est près de 9 fois plus élevée dans le combustible MOX usé.

Les résultats détaillés de calculs de radiotoxicité sont regroupés, en annexe, dans les tableaux 6 (inhalation) et 7 (ingestion). Les figures ci-dessous en reprennent les principaux contributeurs toxiques, ainsi que la toxicité totale des plutoniums et des plutoniums + actinides mineurs.

Les radiotoxicités des plutoniums dans le MOX neuf et dans le MOX usé sont très proches, par contre la création des actinides mineurs dans le MOX usé augmente la radiotoxicité de l'ensemble plutonium + actinides mineurs de plus de 80 % la radiotoxicité initiale du MOX.

10 - En matière d'inhalation, le facteur de dose que nous considérons concerne les personnes adultes du public (17 ans et plus), exposées à l'inhalation d'aérosols de type M. Les types d'absorption pulmonaire sont, suivant la forme chimique du plutonium et des actinides mineurs, de type rapide, moyen ou lent (Fast, Medium, Slow). Plus la vitesse d'élimination est lente, plus la dose engagée est importante. Dans le cas de l'ingestion, un seul facteur de dose couvre toutes les formes chimiques de l'isotope du plutonium ou de celui de chacun des autres actinides considérés.

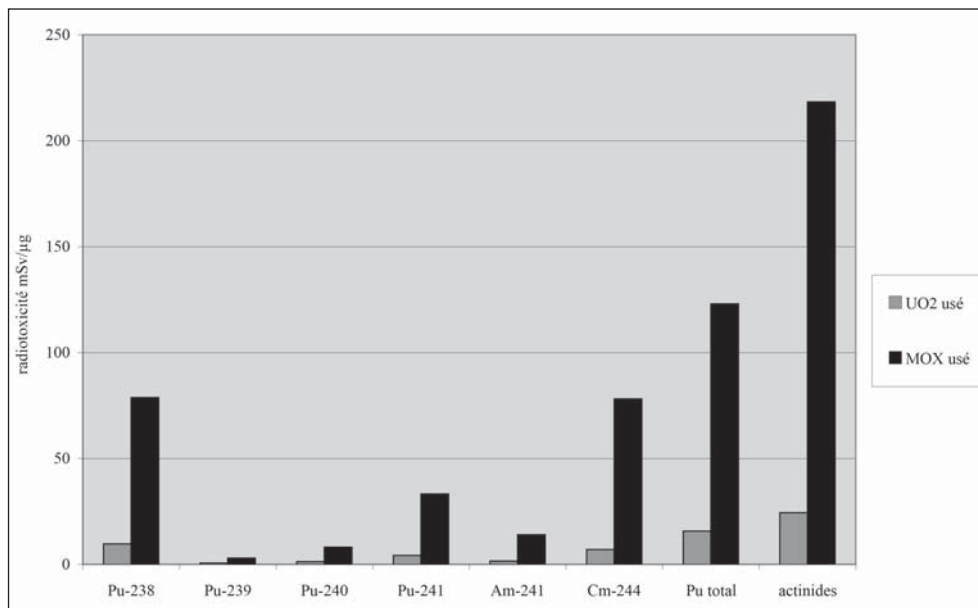
Figure n° 2 : Comparaison des toxicités consécutives à l'ingestion d'un μg de métal lourd issu d'un combustible UO_2 et d'un combustible MOX usé (taux de combustion $45 \text{ GWj/t}_{\text{MLi}}$)



Sources : Directive 1996, IRSN 2000 et IRSN 2012

La radiotoxicité du plutonium et des actinides mineurs consécutive à l'ingestion d'un μg de combustible MOX usé est multipliée par 8,75 par rapport à celle de l'ensemble des actinides d'un combustible UO_2 usé.

Figure n° 3 : Combustibles UO_2 et MOX usés à $45 \text{ GWj/t}_{\text{MLi}}$, toxicité par inhalation d'un μg de combustible initial

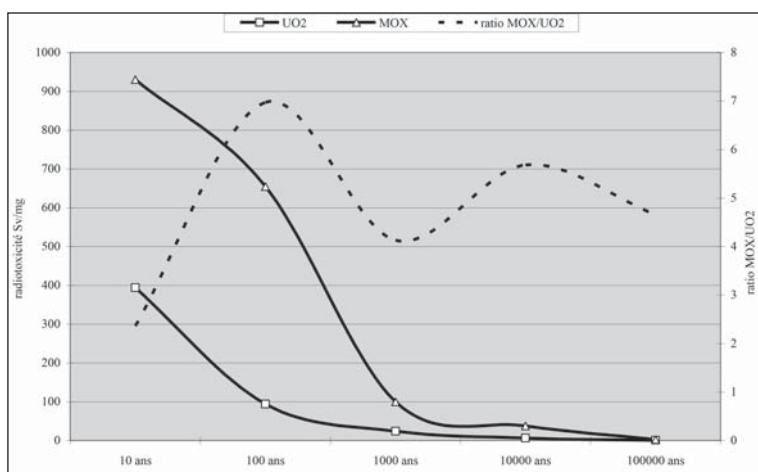


Sources : Directive 1996, IRSN 2000 et IRSN 2012

La radiotoxicité du plutonium et des actinides consécutive à l'inhalation d'un μg de combustible MOX usé est multipliée par 8,95 par rapport à celle des actinides dans un combustible UO_2 usé.

La prépondérance de la radiotoxicité à moyen et long terme des plutoniums et actinides mineurs était observée dans une étude de l'AEN OCDE de 2006¹¹. Le rapport des toxicités rapportées à l'unité de masse de métal lourd initial MOX/ UO_2 à 10 ans de refroidissement est de 2,4. Il passe à 7 à 100 ans avec la disparition progressive de la radiotoxicité des produits de fission ($T_{1/2}$ maximum ≈ 30 ans), pour s'établir à 5 pour le million d'années suivantes.

11 - AEN OCDE, Very high burn-ups in light water reactors. 2006, n° 6224, pages 57-58.

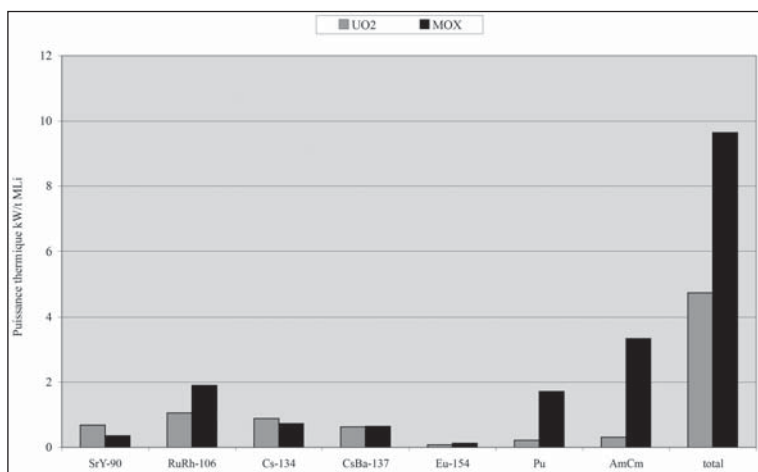
Figure n° 4 : Combustibles UO₂ et MOX usés à 45 GWj/t, évolution de la toxicité

Source : AEN OCDE 2006

4 - Thermique des combustibles UO₂ et MOX usés

4.1 Données thermiques après trois ans de refroidissement

À partir des données thermiques associées à l'activité résiduelle des combustibles UO₂ (33 GWj/t)¹² et connaissant l'activité des principaux radionucléides dans les combustibles UO₂ (45 GWj/t)¹³ et MOX (45 GWj/t)¹⁴ usés, nous pouvons reconstituer les caractéristiques thermiques de ces deux derniers types de combustibles après trois ans de refroidissement. Les résultats détaillés sont donnés en annexe dans les tableaux 8 et 9.

Figure n° 5 : Principaux contributeurs thermiques des combustibles UO₂ et MOX usés, après trois années de refroidissement

Sources : Cogéma 1979, IRSN 2000 et IRSN 2012

Malgré un spectre de produits de fission¹⁵ un peu différent, le potentiel thermique global de l'UO₂ et du MOX est sensiblement le même (respectivement 4,13 kW/t et 4,52 kW/t). L'activité des radionucléides produits par activation, ne représente qu'environ 1,2 % de l'activité des produits de fission produits dans les deux types de combustible.

Ce sont les plutoniums et les actinides qui font la différence entre les deux combustibles.

12 - Rapport public de sûreté usine UP2-800. Cogéma, Établissement de la Hague. Édition de novembre 1979.

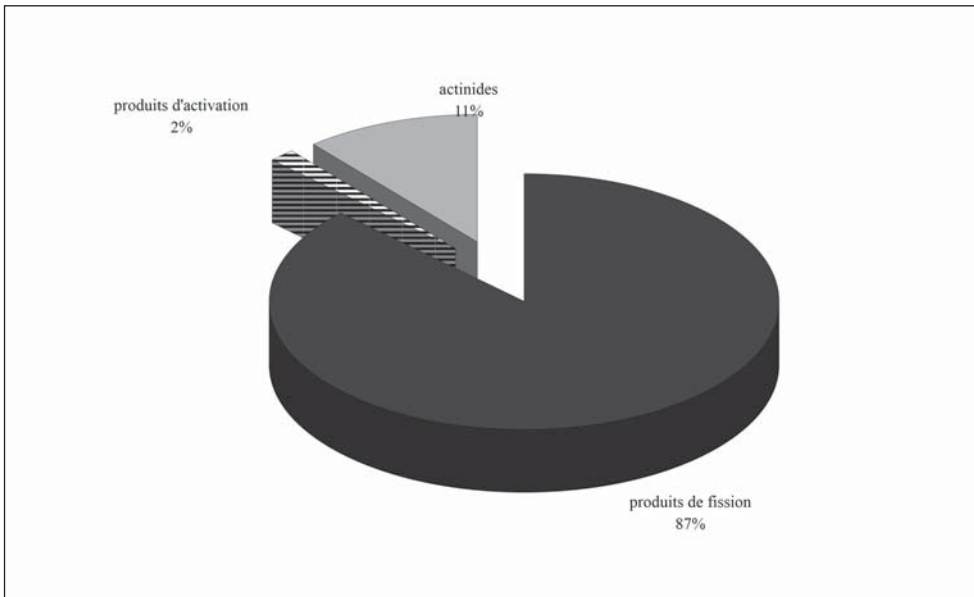
13 - Tables de composition et d'activité des combustibles de type REP calculées par l'IRSN avec le code CESAR 4. Document de travail GRNC, 27 juin 2000.

14 - Référentiel de connaissance et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Dossier 2005 ANDRA. Juin 2005.

15 - Environ 2 fois plus de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y dans l'UO₂ (0,68 kW/t) que dans le MOX (0,36 kW/t) et environ 1,8 fois moins de ¹⁰⁶Ru/¹⁰⁶Rh dans l'UO₂ (1,06 kW/t) que dans le MOX (1,90 kW/t).

Après trois ans de refroidissement, les produits de fission représentent 87 % du potentiel thermique d'un combustible UO_2 (figure n° 6).

Figure n° 6 : Contributions thermiques dans un combustible UO_2 ($4,74 \text{ kW/t}_{MLi}$)

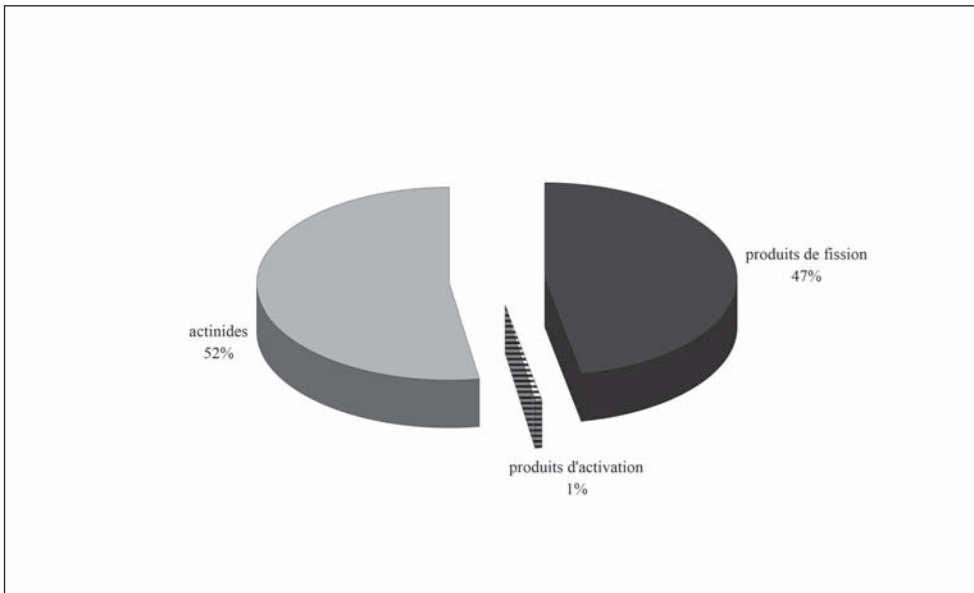


Sources : Cogéma 1979, IRSN 2000 et IRSN 2012

Dans le combustible MOX, cette contribution thermique des produits de fission, à peu près équivalente en valeur absolue, ne représente plus que 47 % du potentiel thermique (figure n° 7) car le potentiel thermique d'un combustible MOX est deux fois supérieur à celui d'un combustible UO_2 ($9,64 \text{ kW/t}$ contre $4,74 \text{ kW/t}$).

Les plutoniums et actinides mineurs qui ne représentent que 11 % du potentiel thermique du combustible UO_2 , constituent 52 % de celui du combustible MOX (respectivement $0,53 \text{ kW/t}$ et $5,06 \text{ kW/t}$, soit un rapport 9,5).

Figure n° 7 : Contributions thermiques dans un combustible MOX ($9,64 \text{ kW/t}_{MLi}$)

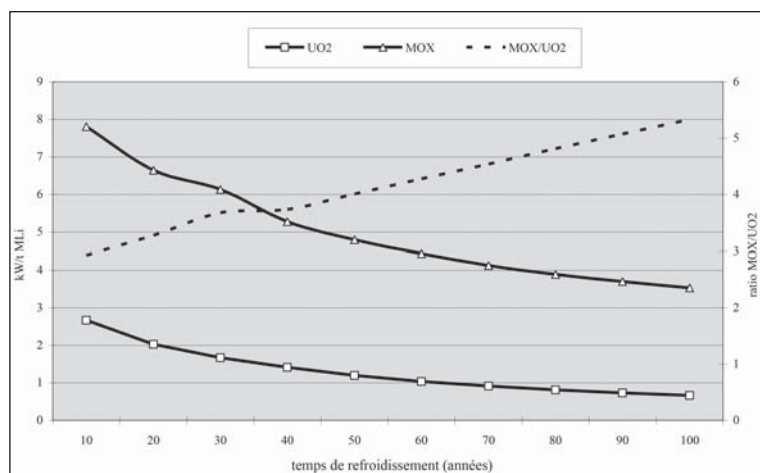


Sources : Cogéma 1979, IRSN 2000 et IRSN 2012

4.2 Données thermiques, jusqu'à 300 ans de refroidissement

La courbe de refroidissement du combustible MOX usé se distingue significativement de celle de l' UO_2 usé. Après 10 ans, l'énergie thermique dissipée par le MOX correspond à celle de l' UO_2 après 2,5 années de refroidissement (figure n° 8).

Figure n° 8 : Combustibles UO_2 (60 GWj/t) et MOX (65 GWj/t) usés, évolution du potentiel thermique de 6 mois à 10 ans après sortie de réacteur (en kW/t)

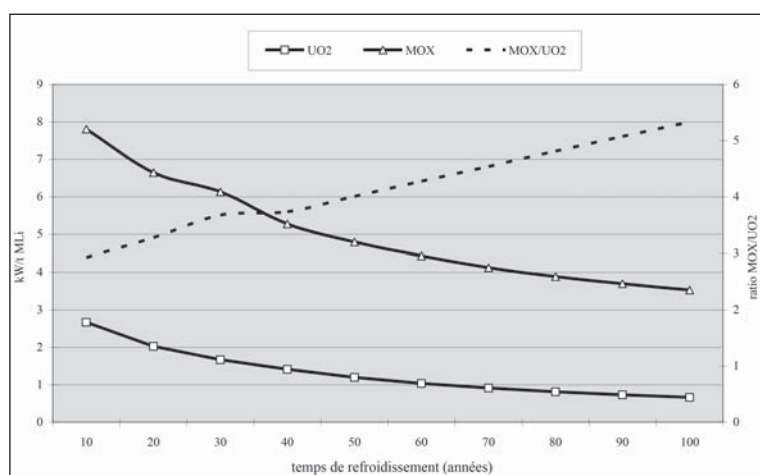


Sources : IRSN 2012 et AREVA 2012¹⁶

Soixante dix ans après la sortie de réacteur, le potentiel thermique du MOX usé est encore équivalent à celui d'un combustible UO_2 refroidi 5 ans : environ 4 kW/t pour des combustibles usés à 65 GWj/t (figure n° 9).

Les évolutions comparées des énergies thermiques dissipées par les différents combustibles montrent que le rapport entre le MOX et l' UO_2 usés vont en augmentant de façon continue. Égal à 2,8 à 10 ans, le rapport des potentiels thermiques est de 5,3 à 100 ans (figures n° 9 et n° 10).

Figure n° 9 : Combustibles UO_2 (60 GWj/t) et MOX (65 GWj/t) usés, évolution du potentiel thermique de 10 à 100 ans après sortie de réacteur¹⁷ (en kW/t)



Source : IRSN 2012

Si l'ANDRA a défini une période minimale de 100 ans pour la réversibilité du stockage géologique, le temps de refroidissement des déchets de haute activité à vie longue (HAVL) avant de procéder à l'enfouissement géologique est d'environ 60 ans¹⁸.

Dans l'hypothèse où le stockage géologique des déchets vitrifiés ou des combustibles¹⁹ UO_2 ne peut survenir qu'après un délai de 60 ans (potentiel thermique < 1 kW/t) les figures n° 9 et n° 10 montrent, qu'à conditions égales de conditionnement, même après 3 siècles, les combustibles MOX usés ne pourront pas être enfouis dans un site de stockage géologique.

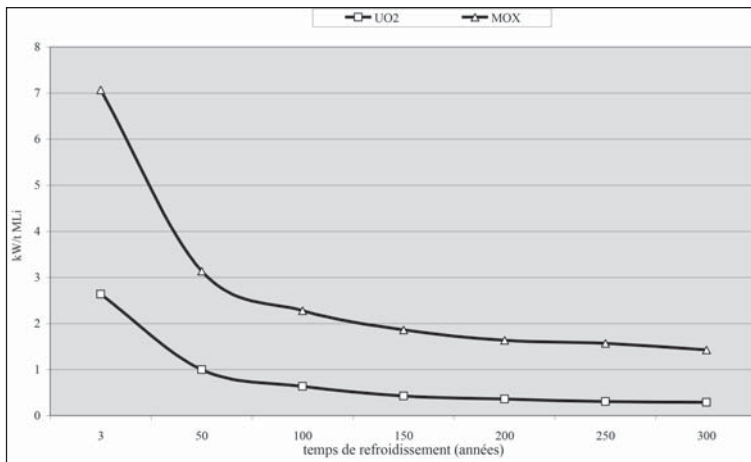
16 - AREVA 2012. Puissance thermique des combustibles MOX et UOX, Lettre HAG 0 0000 12 2021 du 12 octobre 2012.

17 - Ces données calculées prennent en compte la décroissance des principaux actinides, et leur transformation en actinide de rang inférieur : ^{244}Pu , ^{242}Pu , ^{242}Am , ^{238}Pu et notamment les transformations $^{241}Pu \rightarrow ^{241}Am$, puis $^{241}Am \rightarrow ^{237}Np$, contributrices majeures du potentiel thermique à 100 ans de refroidissement (environ + 1,6 kW/t_{MLI} pour des combustibles usés à 65 GWj/t, soit de l'ordre de la moitié du potentiel thermique à cette échéance).

18 - Dans son inventaire 2012, l'ANDRA précise (page 151/212) que l'entreposage des PF et actinides mineurs vitrifiés, dans les puits ventilés de La Hague, sera maintenu 60 ans environ.

19 - En France, les combustibles ne sont pas considérés comme des déchets, mais l'ANDRA a inclus les combustibles usés dans ses analyses, afin de prendre en compte d'éventuels changements concernant la politique actuelle sur le cycle du combustible.

Figure n° 10 : Combustibles 45 GW/t_{MLI}, UO₂ et MOX usés, évolution du potentiel thermique après 3 ans de refroidissement en piscine réacteur (en kW/t)



Source : Coeytaux X. et Marignac Y. 2004, d'après EDF, Gestion du combustible MOX usé et des déchets associés, janvier 2000

Ce pouvoir calorifique élevé et persistant des MOX est dû principalement au fait que :

1. Les isotopes du plutonium et du curium sont des émetteurs alpha (hormis le ²⁴¹Pu, émetteur β de faible énergie mais dont le « fils », l'²⁴¹Am est un émetteur α) qui délivrent la totalité de leur énergie élevée dans le combustible.
2. Par décroissance les plutoniums donnent des américiums ou des uraniums, les américiums donnent à leur tour des curiums ou des neptuniums tandis que les descendants des curiums redonnent des plutoniums.

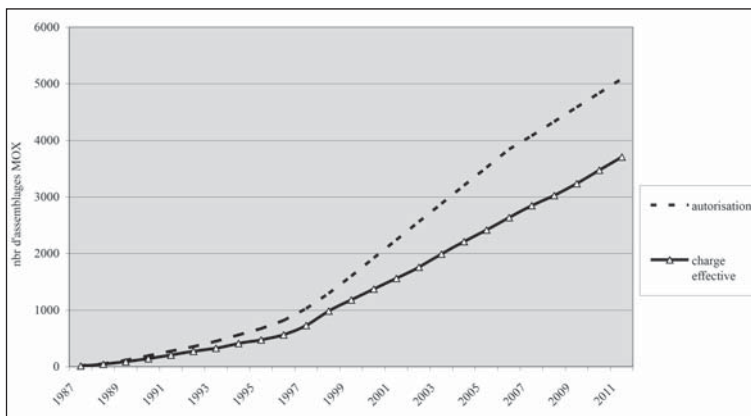
Cette énergie thermique élevée est aussi persistante, du fait de cette longue filiation d'émetteur α et de la lente décroissance des isotopes du plutonium (²³⁸Pu, T_{1/2} = 87,7 ans et ²⁴⁰Pu, T_{1/2} = 6 560 ans), de l'américium, notamment de l'²⁴¹Am (T_{1/2} = 432,7 ans) descendant du ²⁴¹Pu et du curium, notamment du ²⁴⁴Cm (T_{1/2} = 18,1 ans) qui se transforme en ²⁴⁰Pu par décroissance.

5 - Historique du combustible MOX dans les réacteurs d'EDF

C'est en 1987 que EDF a chargé son premier réacteur de 900 MWe (St Laurent – B1, suivi par Gravelines 3 et 4) avec du combustibles à oxyde mixte UO₂ + PuO₂ (MOX).

Depuis, sur les 34 réacteurs de 900 MWe du parc EDF, 28 ont une technologie qui leur permet de recevoir du combustible MOX. Sur les 22 réacteurs autorisés à fonctionner avec du combustible MOX (deux autres sont dans l'attente d'une autorisation) 21 en sont actuellement chargés.

Figure n° 11 : Reconstitution des chargements autorisés en combustibles MOX, comparés aux chargements réels dans les réacteurs EDF



Sources : OPECST, EDF

Hypothèse : Cœurs chargés à 30 % en MOX, avec une première charge de 16 assemblages de MOX, puis déchargement de 16 assemblages de combustible MOX par réacteur, quatre ans après la première charge, pour chacun des cœurs chargés en combustibles MOX jusqu'en 2006.

À partir de 2007, la gestion du MOX est faite par ¼ de cœur, comme pour le combustible UO₂ : soit un déchargement/chargement de 12 assemblages MOX.

Comparaison de ces dispositions avec les chargements effectifs (EDF 2011)²⁰.

Fin 2011, ce sont environ 3700 assemblages de combustibles Mox (1700 t de MOX, ou l'équivalent de 23,6 cœurs de réacteurs à 100 % MOX, soit environ 100 t de plutonium) qui ont été chargés dans les réacteurs EDF, voir Figure n° 11.

6 - Entreposages des combustibles MOX et du plutonium à La Hague, données publiées par les exploitants et données reconstituées

Le bilan des stockages de combustibles MOX EDF en piscines à La Hague et du plutonium extrait des combustibles UO₂ et entreposé, peut être estimé à partir de données partielles d'AREVA NC, de l'ANDRA, d'EDF.

En l'absence de données publiées par AREVA NC, nous avons été conduits à évaluer les quantités de MOX entreposées dans les piscines et dans les bâtiments de La Hague.

De 2006 à 2011, les tonnages de combustibles MOX ont été reconstitués (italique) à partir du déchargement de 100 t/an pour les années 2008 à 2011 (reconstitution d'après données EDF), et du nombre de réacteurs de 900 MWe utilisant du combustible MOX, ou complétées par des données de l'ANDRA pour les années 2007 et 2011 (tableau n° 4 et figure n° 11).

Fin 2011, le bilan des combustibles MOX, présents dans les piscines de la Hague s'établirait à 1140 t. À cette date, il faut ajouter à ce bilan du MOX usé, de l'ordre de 100 t de rebuts de combustibles MOX neufs.

Tableau n° 4 : Site de La Hague, évolution du stockage dans les piscines et du stock de Pu entreposé, données en tonnes d'uranium ou de plutonium

Tonnages de combustibles	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Combustible UO₂ usé		7156	7410						
Combustible URT usé		155	172						
Combustible MOX usé Hague		479	543	<i>640</i>	<i>740</i>	<i>840</i>	<i>940</i>	1040	1140
Rebuts MOX neufs²²	<i>86 à 91</i>	<i>88 à 95</i>	<i>89 à 98</i>	<i>90 à 102</i>	<i>91 à 106</i>	<i>92 à 109</i>	<i>94 à 113</i>	<i>95 à 116</i>	<i>96 à 120</i>
Combustibles MOX usés EDF	450	550	600	700	800	900	1000	1100	1200
Total combustibles REP		7790	8125		8831	9170	9421	9539	
PuO₂ EDF²³	25,8	26			29			27	
Total PuO₂ (EDF+étranger)		50,7			61	62	60	60	

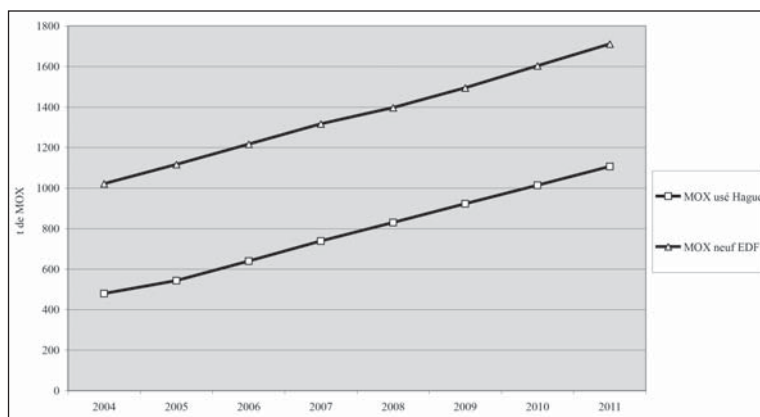
Sources : AREVA NC, EDF 2009 et ANDRA 2009 et 2012, tonne = tonne de métal lourd initial.

20 - Utilisation du MOX dans les réacteurs EDF. Recyclage – EDF/DCN – SFEN 5 octobre 2011.

21 - Aux 84 t de rebuts MOX entreposées en 2001, s'ajoutent 12 à 36 t/an de rebuts pour la période 2001 – 2011 (1 à 3 % de la fabrication de 120 t/an de combustibles MOX pendant 10 ans).

22 - 18,8 t de plutonium étaient entreposées à la Hague au 31/12/98. Au 31 décembre 2000, le stock atteignait 22,4 tonnes (rapport OPECST mai 2001, page 109).

Figure n° 12 : Évolution du stockage des combustibles MOX dans les piscines de la Hague



Sources : AREVA NC, EDF et ANDRA

Les MOX neufs représentent les assemblages reçus par EDF en provenance de l'usine Mélox.

6.1 Bilan national des combustibles MOX neufs et usés

Nous pouvons également esquisser un bilan national des MOX dont la majorité du tonnage est entreposée à La Hague.

A cet entreposage de longue durée, des combustibles « usés » (1 140 t) et des rebuts MOX (environ 100 t), réalisé à la Hague s'ajoute le bilan des MOX présents dans les centrales d'EDF : 390 tonnes de MOX usés entreposées en piscines réacteur auxquels s'ajoutent les 300 tonnes chargées dans les réacteurs, soit environ 1 930 t de MOX fabriqué, estimé en fin 2011.

Fin 2011, le tonnage total de combustible MOX fabriqué (neuf, usé ou rebuté) est d'environ 1 930 tonnes. A cette date, le tonnage de plutonium entreposé dans les usines de La Hague, sous forme de PuO_2 , est environ égal à 57 tonnes. Ce plutonium se répartit en deux fractions approximativement égales : l'EDF et les clients étrangers d'AREVA (majoritairement Japon). Contractuellement, ces clients peuvent récupérer leur plutonium, sous réserve d'en justifier l'usage.

7- Conclusions

L'introduction progressive du combustible MOX dans les réacteurs d'EDF depuis 1987, est souvent présentée comme une substitution positive. Les critères retenus pour porter ce jugement sont l'économie de matière première (uranium naturel) et d'énergie, celle nécessaire pour l'enrichissement de l'uranium en son seul isotope fissile, l'uranium 235.

Si le retraitement vise à séparer en trois parties les constituants du combustible usé (uranium, plutonium et le reste des radionucléides formés), il ne modifie aucunement les caractéristiques nucléaires de ces substances. Recycler le plutonium, extrait lors du retraitement des combustibles UO_2 , revient donc à réduire l'activité du déchet que constituerait le combustible « usé » laissé en l'état. Ces éléments constituent la face positive du recyclage, mais nous avons voulu explorer les problèmes induits par la fermeture du cycle.

Nous avons pour cela examiné le bilan des radionucléides produits par le recyclage du plutonium, notamment leur toxicité et la charge thermique associée au combustible MOX usé. Pour ces évaluations, nous avons pris pour référence la filière classique des combustibles à uranium enrichi.

Les paramètres pris en compte, pour des combustibles présentant les mêmes taux de combustion et refroidis 3 ans, se sont tous révélés en défaveur du MOX : l'activité totale des transuraniens (facteur 8,1), le débit de fluence neutronique ($f = 10$), la toxicité radioactive ($f = 8,8$) et l'énergie thermique dissipée ($f = 2$ à 7). Seule la production de produits de fission est très voisine ($f = 1,09$) pour les deux types de combustibles.

Au fur et à mesure du refroidissement, la décroissance des produits de fission et d'activation fait apparaître une différence des énergies thermiques des deux types de combustibles, qui va croissant. Après 60 ans de refroidissement, délai permettant l'enfouissement géologique des combustibles UO_2 (énergie < 1 kW/t), les combustibles MOX dissipent encore 4,3 fois plus d'énergie thermique que les UO_2 .

Avec 150 ans de refroidissement, les MOX dissipent encore 2,9 fois plus d'énergie que les UO_2 à 60 ans. Après trois cents ans de refroidissement, les combustibles MOX ont toujours un potentiel thermique 2,3 fois supérieur à celui qui autoriserait le stockage géologique des combustibles UO_2 .

La masse du colis prévu pour les combustibles UO_2 est égale à 8 fois la masse des éléments combustibles. Pour réaliser l'enfouissement des MOX il sera nécessaire d'augmenter significativement la masse du conteneur afin que la dissipation de l'énergie réduise suffisamment la température en surface du colis. Le maximum autorisé est voisin de 90 °C, afin de ne pas détériorer les performances de la roche d'accueil.

Ainsi, aux différents surcoûts dus à la fabrication du MOX, à sa gestion spécifique dans le réacteur et à la durée de son entreposage va s'ajouter le surcoût du stockage géologique. Des données qui invitent à s'interroger sur l'avantage économique présenté par le recyclage du plutonium.

8 - Bibliographie

- AEN OCDE 2006. Very high burn ups water reactors. 2006, n° 6224.
- ANDRA 2005. Référentiel de connaissance et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue. Dossier 2005, ANDRA, juin 2005.
- ANDRA 2009. Inventaire national des déchets radioactifs. Rapport de synthèse 2009.
- ANDRA 2012. Inventaire national des déchets radioactifs. Rapport de synthèse 2012.
- AREVA NC 2011. Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'AREVA NC La Hague. Rapport 2010.
- AREVA NC 2012. Puissance thermique des combustibles MOX et UOX, lettre HAG 0 000 12 2021 du 12 octobre 2012.
- CEA 2005. Le traitement des combustibles usés : une filière bien maîtrisée, Clefs CEA n° 53, hiver 2005 – 2006.
- Coeytaux X, Marignac Y. 2004, MOX fuel and high burn-ups struggling with antagonist aims, Report commissioned by Greenpeace International, 29 July 2004
- Cogéma 1979. Rapport public de sûreté usine UP2-800. Cogéma, Établissement de la Hague. Édition de novembre 1979.
- Directive 1996. Directive 96/29 Euratom du 13 mai 1996, JO des communautés européennes, 29 juin 1996.
- EDF 2009. Le cycle du combustible nucléaire d'EDF. Rapport pour la réunion du HCTSIN du 30 novembre 2009.
- EDF 2011. Le recyclage des matières issues du traitement des combustibles usés d'EDF. Exposé SFEN, 5 octobre 2011.
- Goldsmith P. 1997. Document législatif n° 1 – 684/1. Sénat de Belgique, session de 1996 – 1997, 17 juin 1997.
- GRNC 2002. Activité massique des actinides, document de travail du GRNC. Notes personnelles 2002.
- IRSN 2000. Tables de composition et d'activité pour un combustible REP de 17 x 17. Note NT SPRC LCPA 90-212, juin 2000.
- IRSN 2012. Table de composition et d'activité pour un combustible MOX 45 GWj/t refroidi trois ans. Communication personnelle, 29 mars 2012.
- Laponche B, Zerbib J.C, 2011. Plutonium et combustible MOX, Gros plan n° 3. Les cahiers de Global Chance, n° 29, avril 2011.
- Marignac Y. 2003. Le problème de la thermique des piscines à La Hague. Note de synthèse. WISE-Paris, 27 février 2003.
- Marignac Y. 2011. Le « cycle » du combustible nucléaire français : analyse critique du bilan actuel. Notes du 15 juillet 2011.
- OPECST 2001. Rapport sur les possibilités d'entreposage à long terme de combustibles nucléaires irradiés. Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques. N° 3101, 30 mai 2001.
- Schapira J.P. 1990. Une nouvelle stratégie pour le plutonium. La Recherche n° 226, novembre 1990.

Annexe

Tableau n° 5 : Risques toxiques comparés des ensembles produits de fission et produits d'activation et ensemble des actinides dans les combustibles UO₂ et MOX, usés à 45 GWj/t, après trois ans de refroidissement

risque (mSv/μg)	inhalation		ingestion	
	UO ₂	MOX	UO ₂	MOX
combustible usé				
PF + PA	0,45	0,47	0,27	0,23
actinides	24,37	218,30	0,12	1,05
total	24,82	218,77	0,39	1,28

Sources : Directive 1996, IRSN 2000 et IRSN 2012

Tableau n° 6 : Doses engagées par les isotopes du plutonium et des principaux actinides mineurs dans le cas d'inhalation d'aérosols de combustibles par une personne du public

Radionucléide	Période (ans)	Facteur de « modéré » (Sv/Bq)	dose par μg d'U initial (mSv/μg)		
			UO ₂ usé	MOX neuf	MOX usé
²³⁶ Pu	2,87	2,0.10 ⁻⁵	4,40.10 ⁻⁵	1,30.10 ⁻⁴	8,20.10 ⁻⁵
²³⁸ Pu	87,7	4,6.10 ⁻⁵	9,6	72,96	70
²³⁹ Pu	24 065	5,0.10 ⁻⁵	0,67	5,3	2,83
²⁴⁰ Pu	6 537	5,0.10 ⁻⁵	1,18	9,3	7,95
²⁴¹ Pu	14,4	9,0.10 ⁻⁷	4,1	25,79	31,7
²⁴² Pu	376 300	4,8.10 ⁻⁵	5,95.10 ⁻³	0,05	0,05
²³⁷ Np	2,14. 10 ⁶	2,3.10 ⁻⁵	3,66.10 ⁻⁴		9,50.10 ⁻⁵
²⁴¹ Am	432,7	4,2.10 ⁻⁵	1,51		12,8
²⁴² Am	152	1,7.10 ⁻⁸	2,11.10 ⁻⁶		1,22.10 ⁻⁴
²⁴³ Am	7380	4,1.10 ⁻⁵	7,42.10 ⁻²		0,56
²⁴² Cm	0,45	5,2.10 ⁻⁶	0,16		1,43
²⁴³ Cm	28,5	3,1.10 ⁻⁵	4,12.10 ⁻²		0,63
²⁴⁴ Cm	18,1	2,7.10 ⁻⁵	6,92		82,22
Pu total			15,64	113,59	123,04
Pu total + actinides mineurs			24,37		218,3

Sources : Directive 1996, IRSN 2000 et IRSN 20

Tableau n° 7 : Doses engagées par les isotopes du plutonium et des principaux actinides mineurs dans le cas d'ingestion de particules de combustibles par une personne du public

Radionucléide	Période (ans)	Facteur de dose « modéré » (Sv/Bq)	dose par µg d'U initial (mSv/µg)		
			UO ₂ utilisé	MOX neuf	MOX utilisé
²³⁸ Pu	2,87	8,7.10 ⁻⁸	1,91.10 ⁻⁶	5,5*9.10 ⁻⁷	3,55.10 ⁻⁷
²³⁹ Pu	87,7	2,3.10 ⁻⁷	0,048	0,36	0,355
²⁴⁰ Pu	24 065	2,5.10 ⁻⁷	0,003	0,03	0,14
²⁴¹ Pu	6537	2,5.10 ⁻⁷	0,006	0,05	0,04
²⁴² Pu	14,4	4,8.10 ⁻⁹	0,022	0,13	0,163
²⁴³ Pu	376 300	2,4.10 ⁻⁷	2,98.10 ⁻⁵	2,28.10 ⁻⁴	2,54.10 ⁻⁴
²³⁷ Np	2,14. 10 ⁶	1,1.10 ⁻⁷	1,75.10 ⁻⁶		4,54.10 ⁻⁷
²⁴¹ Am	432,7	2,0.10 ⁻⁷	0,007		0,061
²⁴² Am	152	1,9.10 ⁻⁷	3,72.10 ⁻⁸		2,15.10 ⁻⁶
²⁴³ Am	7 380	2,0.10 ⁻⁷	2,62.10 ⁻⁴		0,003
²⁴⁴ Cm	0,45	1,2.10 ⁻⁸	3,76.10 ⁻⁴		0,003
²⁴⁵ Cm	28,5	1,5.10 ⁻⁷	2,00.10 ⁻⁴		0,003
²⁴⁶ Cm	18,1	1,2.10 ⁻⁷	0,031		0,365
Pu total			0,08	0,611	0,62
Pu total + actinides mineurs			0,12		1,05

Sources : Directive 1996, IRSN 2000 et

Effluents liquides et gazeux, principaux radionucléides artificiels

Caractéristiques radioactives et thermiques des combustibles UO₂ et MOX

Taux de combustion : UO₂ 45 GWj/t, MOX 45 GWj/t, Refroidissement = trois années

Tableau N° 8 : Produits de fission et produits d'activation, activité et puissance thermique

Elément	Groupe de radiotoxicité	Emission	Période	UO ₂ 3 ans (45 GWj/t)		MOX 3 ans (45 GWj/t)	
				Activité (TBq/t)	Puissance (W/t)	Activité (TBq/t)	Puissance (W/t)
³ H	4	β	12,3a	30,18	0,04	22,2	0,027
¹⁴ C	3	β	5 730 a	0,038		0,028	
³⁶ Cl	3	β	3,0.10 ⁵ a			3,5.10 ⁻⁴	
⁵⁵ Fe	3	x	2,68 a	45,26	1,60	126	4,44
⁶⁰ Co	2	β, γ	5,3 a	219	68	87	37
⁶³ Ni	3	β	100 a			10,8	
⁹⁰ Sr	2	β	28,2 a	3 213	102	1 674	53
⁹⁰ Y	2	β	58,5 j	3 213	581	1 674	303
⁹⁵ Zr/Nb	4	β, γ	10,7 a	370	15	239	
⁹⁹ Tc	4	β, γ	2,1.10 ⁵ a	0,72	0,013	0,647	0,01
¹⁰⁶ Ru	2	β, γ	373 j	3 374	5,40	6 070	9,71
¹⁰⁶ Rh	2	β, γ	373 j	3 374	1050	6 070	1889
¹⁰⁷ Pd	4	β	6,5.10 ⁶ a			0,133	
¹¹⁰ Ag	2	β, γ	24,7 s	250	49	245	48
¹²⁶ Sn	2	β	1,0.10 ⁵ a			0,0434	
¹²⁵ Sb/ ^{125m} Te	3	β, γ, x	2,76 a	176	15	254	22
¹²⁹ I	4	β, γ, x	1,6.10 ⁷ a	1,53.10 ⁻³	2,50.10 ⁻⁵	1,94.10 ⁻³	3,17.10 ⁻⁵
¹³⁴ Cs	2	β, γ	2,07 a	3217	887	2 650	731
¹³⁵ Cs	4	β	2,3.10 ⁶ a	0,076		0,052	
¹³⁷ Cs	3	β, γ	30,15 a	4 910	137	5020	140
^{137m} Ba	3	β, γ	30,15 a	4 647	493	4740	503
¹⁴⁴ Ce	2	β, γ, x	285 j	3 180	57	3 010	54
¹⁴⁴ Pr	2	β, γ, x	285 j	3 180	658	3 010	623
¹⁴⁷ Pm	3	β, γ	2,62 a	3 186	32	3 600	33
¹⁵¹ Sm	2	β, γ, x	90 a	18,25	0,06	55,7	0,18
¹⁵⁴ Eu	2	β, γ, x	8,6 a	325,7	78	529	127
¹⁵⁵ Eu	2	β, γ, x	4,73 a	380	0,86	130	0,30
Total produits de fission				36 501	4 130	38 503	4 516
Total produits d'activation				440	85	467	63

Sources : Cogéma 1976, IRSN 2000 et IRSN 2012 Nota : t = tonnes de métal lourd initial

Tableau N° 9 : Actinides, activité et puissance thermique

Elément	Groupe de radiotoxicité	Emission	Période	UO ₂ 3 ans (45 GWj/t)		MOX 3 ans (45 GWj/t)	
				Activité (TBq/t)	Puissance (W/t)	Activité (TBq/t)	Puissance (W/t)
²³² U	1	α	69,8 a	1,88.10 ⁻³	1,63.10 ⁻³	1,45.10 ⁻³	1,26.10 ⁻³
²³⁴ U	1	α	2,44.10 ⁵ a	0,05	0,036	0,0253	0,02
²³⁵ U	4	α, γ, x	7,04.10 ⁸ a	5,49.10 ⁻⁴	4,14.10 ⁻⁴	8,94.10 ⁻⁵	6,75.10 ⁻⁵
²³⁶ U	2	α, γ, n	2,34.10 ⁷ a	1,15.10 ⁻²	8,46.10 ⁻³	5,43.10 ⁻⁴	4,00.10 ⁻⁴
²³⁸ U	4	α γ, n	4,47.10 ⁹ a	1,15.10 ⁻²	7,87.10 ⁻³	1,10.10 ⁻²	7,53.10 ⁻³
²³⁷ Np	1	α, γ, x	2,14.10 ⁶ a	1,59.10 ⁻²	0,013	4,55.10 ⁻³	3,61.10 ⁻³
²³⁶ Pu	1	α	2,86 a	2,22.10 ⁻²	0,021	2,09.10 ⁻²	1,96.10 ⁻³
²³⁸ Pu	1	α, γ, n, x	87,7 a	208,75	187	1710	1 530
²³⁹ Pu	1	α, γ, x	2,41.10 ⁴ a	13,41	11	59,1	49
²⁴⁰ Pu	1	α, γ, n, x	6 563 a	23,52	20	163	137
²⁴¹ Pu	1	α, β, γ	14,4 a	4596	0,05	36500	0,41
²⁴² Pu	1	α, γ, n, x	3,7.10 ⁵ a	0,124	0,10	1,17	0,94
²⁴¹ Am	1	α, γ, x	432,7 a	35,97	32	332	299
^{242m} Am	1	β	152 a	0,45		15	
²⁴³ Am	1	α, γ, x	7 370 a	1,81	1,76	14,7	14
²⁴² Cm	1	α, γ, n, x	162,9 j	31,33	31	2750	275
²⁴³ Cm	1	α, γ, n	28,5 a	1,33	1,31	21,5	21
²⁴⁴ Cm	1	α, γ, n, x	18,1 a	256,5	242	2890	2730
²⁴⁵ Cm	1	α	8 500 a	0,03	0,03	0,771	0,64
²⁴⁶ Cm	1	α, γ, n, x	4 730 a	3,49.10 ⁻⁴	3,06.10 ⁻⁴	0,0789	0,69
Total actinides				5 170	527	41 982	5 060

Sources : Cogéma 1976, IRSN 2000 et IRSN 2012, Nota : t = tonnes de métal lourd initial