

INTRODUCTION

Parmi les grandes problématiques du nucléaire, avec les conséquences d'un accident, on peut trouver la gestion des déchets qui était, jusqu'en 1991 fait de manière plutôt hasardeuse (rejet de baril de déchets radioactif dans la manche...)

C'est le 31/12/1991 que la loi Bataille a été proposée, cette loi a pour objectif de laisser 15 ans, jusqu'en 2006 donc, à la recherche pour trouver une solution pour la gestion des déchets issus de l'exploitation des installations nucléaires de base et plus spécifiquement pour les déchets à moyenne et haute activité à vie longue (MA/HAVL)

Parmi les solutions qui peuvent être proposées, trois axes majeurs de recherche vont se dégager:



Figure 1: Axes de recherche sur la gestion des déchets (source: séparation et transmutation des éléments radioactifs à vie longue, 2012)

Le 28 juin 2006, ce sera le stockage géologique profond qui sera choisi mais les recherches expérimentales ne se sont jamais arrêtées sur le principe de la transmutation qui est de transformer des radionucléides de vie très longue (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années) en radionucléides stables ou à durée de vie courte ou très courte.

Séparation et transmutation

Pourquoi séparer

- Isoler certains radionucléides
- Trier les déchets en fonction de leurs durées de vie
- Réduction du volume de déchets à traiter

Technique de séparation

PUREX	DIAMEX	SESAME	GANEX
• Coextraction Np, U et Pu	• Coextraction Am et Cm	• Séparation Am et Cm suite DIAMEX	• Extractions transuraniens

Figure 2: Les différentes techniques de séparation des déchets (source: séparation et transmutation des éléments radioactifs à vie longue, 2012)

Fonctionnement transmutation

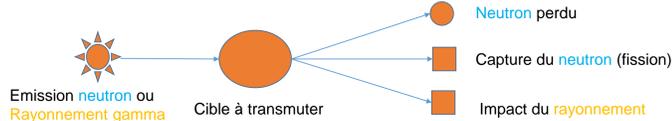


Figure 3: Principe de fonctionnement de la transmutation (source: personnelle)

Cette réaction doit avoir lieu dans un cœur sous critique pour éviter tout accident de criticité qui pourrait engendrer une réaction en chaîne

Types de transmutation

Il existe plusieurs possibilités technologiques pour transmuter des radionucléides dans le cœur d'un réacteur à neutrons rapide (RNR), la cible à transmuter peut être:

- Au centre du combustible RNR
- Diluée dans le combustible RNR
- Dans un cœur sous critique
- Dans un combustible spécifique

Transmutation par diffusion Compton inverse

La transmutation par effet Compton inverse consiste à augmenter l'énergie d'un photon via la collision avec un électron accéléré, ce photon sera suffisamment accéléré pour devenir un rayonnement gamma qui créera une réaction de photodésintégration de la cible

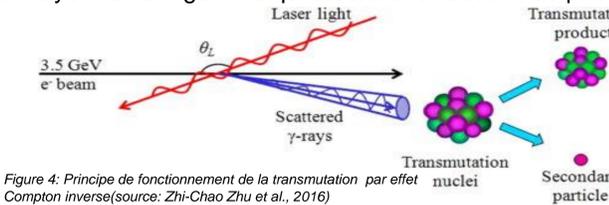


Figure 4: Principe de fonctionnement de la transmutation par effet Compton inverse (source: Zhi-Chao Zhu et al., 2016)

Pour que la photodésintégration se déroule sans accroc, il faut réussir à déployer un rayonnement gamma qui aura une énergie qui favorisera la réaction, c'est-à-dire un rayonnement qui aura la section efficace la plus élevée, en effet, plus la section efficace sera élevée, plus les chances que le rayonnement gamma heurte un noyau seront élevées.

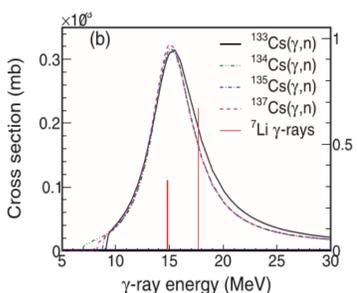


Figure 5: Énergie nécessaire pour obtenir une section efficace la plus grande possible (source: Zhi-Chao Zhu et al., 2020)

Les calculs par la méthode TALYS montre qu'il est possible d'obtenir une section efficace d'environ 0,3 mBarns (équivalent $3 \times 10^{-28} \text{ cm}^2$) pour une énergie du rayonnement gamma $\approx 15 \text{ MeV}$ pour du Césium 135

Des expériences ont ensuite été réalisées pour déterminer quelle énergie laser initiale et à quelle énergie il faut porter l'électron pour obtenir l'énergie nécessaire pour la photo transmutation.

Pour cela, le IHEP (Institute of High Energy Physics, en Chine) a construit un dispositif permettant l'expérimentation de la diffusion Compton inverse en suivant un schéma bien défini:

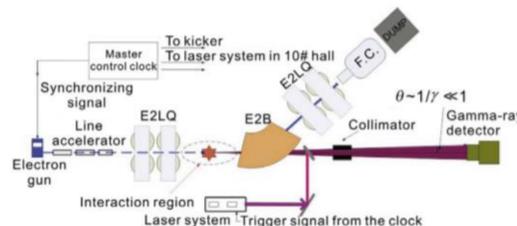


Figure 6: Montage expérimental au IHEP en Chine (source: Guang-Peng An et al., 2018)

L'électron émis par l'accélérateur va rencontrer le laser puis être dévié via un champ électromagnétique avant de finir sa course dans une cage de Faraday. Le faisceau de photon accéléré, devenu rayonnement gamma, va lui passer par un collimateur, qui va s'occuper de rendre tous les photons qui le composent parallèles avant de se diriger vers sa cible

En résultat de cette expérimentation, l'équipe de recherche a pu constater qu'il est loin d'être inenvisageable de réaliser une réaction photonucléaire puisqu'en effet, pour obtenir les 15MeV nécessaire à la réaction, il faut utiliser un électron d'énergie 800 MeV pour collision un laser d'énergie 1eV. C'est une valeur que les synchrotrons sont aisément capables d'atteindre.

Le IHEP a également préparé une installation dans laquelle, à partir d'un seul électron émis, ils sont capables de transmuter 8 à 9 cibles ce qui permettra de réduire le ratio coût/résultat de la photo transmutation

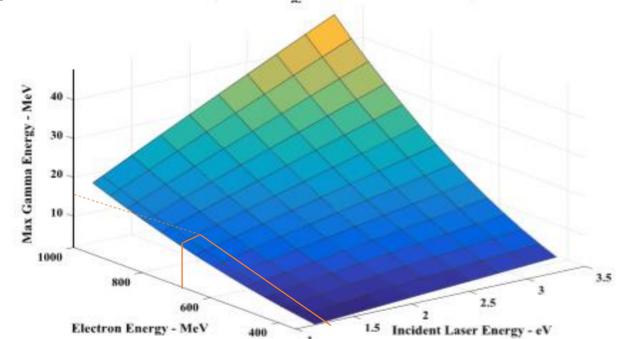


Figure 7: relation entre énergie électron/ énergie laser (source: Haseeb ur Rehman et al., 2017)

Analyse des résultats

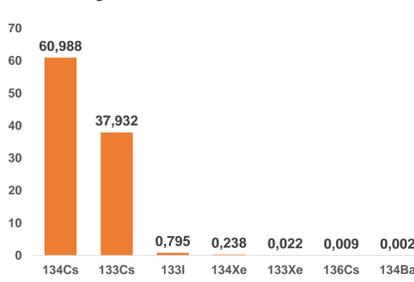


Figure 8: Famille de désintégration et leurs temps de demi-vie du césium 135 (source: Zhi-Chao Zhu et al., 2016)

éléments formé	Temps de demi vie
¹³⁴ Cs	2,07 années
¹³³ Cs	Stable
¹³³ I	8.02 jours
¹³⁴ Xe	5.24 jours
¹³³ Xe	Stable
¹³⁶ Cs	13.16 jours
¹³⁴ Ba	Stable

Les premiers résultats expérimentaux sur la transmutation du Césium 135 montrent qu'elle produit des éléments stables ou de durée vie bien plus courte (Haseeb ur Rehman et al., 2017)

E _e (MeV)	E _l (eV)	Transmutation reaction rates (#/s)		
		¹²⁹ I	¹³⁵ Cs	¹³⁷ Cs
750	1.25	3.16E+09	2.61E+08	6.41E+08
	1.50	6.74E+09	5.66E+08	1.24E+09
	1.75	1.20E+10	1.09E+09	2.33E+09
	2.00	1.42E+10	1.44E+09	3.05E+09

Figure 9: Quantité de désintégration par seconde durant la transmutation (source: Haseeb ur Rehman et al., 2017)

Sur ces expérimentations, IHEP a réussi à produire jusqu'à 1.44×10^9 transmutations par seconde. Cela correspond à 345 grammes par an de matière transmutée, sachant que le césium 135 représente 3,45% des atomes produits durant la réaction de fission, ces produits de fissions représentant 33 kilogrammes par tonnes de combustible

Conclusion

En conclusion, on peut dire que la technique de transmutation par effet Compton inverse peut actuellement fonctionner sur le Césium 135 afin de faire passer ce radionucléide qui a un temps de demi-vie et plusieurs centaines de milliers d'années, à quelques dizaine maximum à un taux satisfaisant, et un coût énergétique plus qu'efficace, qui pourrait encore être amélioré la recherche d'amélioration pour ce procédé. On peut sans doute imaginer appliquer ce procédé à d'autre radionucléides dans un futur plus ou moins proche

Bibliographie

- Guang-Peng An, Yun-Long Chi, Yong-Le Dang, Guang-Yong Fu, Bing Guo, Huang, Y.-S., He, C.-Y., Kong, X.-C., Lan, X.-F., Li, J.-C., Liu, F.-L., Shi, J.-S., Sun, X.-J., Wang, Y., Wang, J.-L., Wang, L., Wei, Y.-Y., Wu, G., Xu, G.-L., Xi, X.-F., Yang, G.-J., Zhang, C.-L., Zhang, Z., Zheng, Z.-P., Zhang, X.-D., Zhang, S.-P., 2018. High energy and high brightness laser Compton backscattering gamma-ray source at IHEP. Matter Radiat. Extrem. 3, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.mre.2018.01.005>
- Haseeb ur Rehman, Jiyoung Lee, Yonghee Kim, 2017. Optimization of the laser-Compton scattering spectrum for the transmutation of high-toxicity and long-living nuclear waste. Ann. Nucl. Energy 105, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.03.014>
- Haseeb ur Rehman, Kwangho Ju, Yonghee Kim, 2019. Photon and neutron hybrid transmutation for radioactive cesium and iodine. Ann. Nucl. Energy 133, 527–537. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.06.029>
- séparation et transmutation des éléments radioactifs à vie longue, 12/2012, ANDRA.
- Zhi-Chao Zhu, Wei-Ting Gong, Hao-Yang Lan, Wen Luo, 2020. Transmutation of radioactive cesium and iodine using gamma-radiation from light nuclei under proton bombardment. Ann. Nucl. Energy 140, 107158. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107158>
- Zhi-Chao Zhu, Wen Luo, Zhuo-Cheng Li, Ying-Ming Song, Xiao-Dong Wang, Xing-Liu Wang, Gong-Tao Fan, 2016. Photo-transmutation of long-lived nuclear waste ¹³⁵Cs by intense Compton γ-ray source. Ann. Nucl. Energy 89, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.11.017>