

**IRSN**INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

# Analyse des possibilités d'entreposage à sec de combustibles nucléaires usés de type MOX ou URE

Rapport IRSN n° 2019-00265

Rapport établi en réponse à une  
saisine de la Commission nationale du  
débat public

Avril 2019



---

## RÉSUMÉ DU RAPPORT

Dans le cadre de la préparation du débat public sur le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2019-2021 (PNGMDR 2019-2021), la Présidente de la Commission nationale du débat public (CNDP) a demandé à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), par lettre du 15 février 2019, de réaliser une expertise concernant l'entreposage à sec de combustibles nucléaires usés à base d'oxyde d'uranium et de plutonium (MOX) ou à base d'oxyde d'uranium de retraitement enrichi (URE).

L'expertise effectuée est présentée dans le présent rapport.

Les caractéristiques des combustibles MOX utilisés par EDF ont évolué au cours du temps. En particulier, leur teneur en plutonium a successivement été de 5,30 %, 7,08 % et 8,65 % (teneur actuelle). Compte tenu des périodes durant lesquelles les combustibles MOX présentant les teneurs en plutonium précitées ont été mis en œuvre, des solutions d'entreposage à sec s'appuyant sur des concepts actuels pourraient, dès à présent, être envisagées pour l'ensemble des combustibles MOX usés de teneur en plutonium égale à 5,30 % et pour la plupart de ceux à 7,08 %, soit de l'ordre de 2 500 assemblages. Pour les premiers combustibles MOX usés de teneur en plutonium de 8,65 %, mis en œuvre depuis 2007, il faudrait attendre environ 2040 pour pouvoir utiliser ce type d'entreposage. Pour limiter la durée d'entreposage sous eau à une dizaine d'années, il faudrait disposer de concepts d'entreposage à sec conçus avec une puissance thermique par combustible usé de l'ordre de 3 kW.

Environ 1 150 combustibles URE ont été chargés dans des réacteurs par EDF entre 1994 et 2013. L'ensemble des combustibles URE usés actuellement entreposés ont une puissance thermique inférieure à 2 kW et sont donc compatibles avec les concepts actuels d'entreposage à sec.

En considérant uniquement l'exigence de sûreté relative à la température de la gaine des combustibles, des évolutions des configurations de chargement des concepts existants pour permettre d'entreposer des combustibles usés de puissance thermique supérieure à 2 kW sont possibles. De même, les configurations de transport, voire les emballages, devraient pouvoir être adaptés pour transporter des combustibles dont la puissance thermique dépasse la valeur repère de 6 kW par combustible. Toutefois, outre la contrainte liée à la température de la gaine des combustibles, les emballages doivent répondre à un ensemble d'exigences de sûreté et de radioprotection, ainsi qu'à des contraintes industrielles (faisabilité, capacité, coût...). Aussi, une analyse globale intégrant tous ces aspects serait nécessaire.

De plus, les opérations à réaliser à l'issue de la phase d'entreposage, sous eau ou à sec, des combustibles usés doivent être prises en compte dès la conception de ces entreposages. En outre, des exigences de sûreté spécifiques seront à retenir pour ces opérations, par exemple concernant les caractéristiques mécaniques des combustibles usés après entreposage. La démonstration du respect de ces exigences, en particulier pour les combustibles MOX usés, pourrait nécessiter des développements particuliers et le programme de surveillance des combustibles entreposés devra prendre en compte ces exigences. La définition et l'étude de l'ensemble de ces exigences ne seraient pas sans impact sur le délai de réalisation d'un éventuel premier entreposage à sec de combustibles MOX usés en France.

En conclusion, l'analyse réalisée par l'IRSN ne fait pas apparaître d'éléments rédhitoires à la possibilité d'entreposer à sec une partie des combustibles MOX et URE actuellement entreposés sous eau. Il conviendrait toutefois d'examiner les différentes options possibles, en intégrant les exigences de sûreté et de radioprotection afférentes ainsi que l'ensemble des contraintes industrielles.

## Table des matières

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	3
1 PRÉSENTATION DE LA SAISINE .....	5
2 ÉLÉMENTS DE CONTEXTE .....	5
3 COMPATIBILITÉ DES COMBUSTIBLES USÉS MOX OU URE AVEC UN ENTREPOSAGE À SEC .....	7
3.1 Combustibles MOX usés.....	7
3.2 Combustibles URE usés .....	9
4 ÉVOLUTIONS ENVISAGEABLES DES CONCEPTS D'ENTREPOSAGE À SEC .....	10
4.1 Rappels sur les concepts actuels d'entreposage à sec .....	10
4.2 Analyse des évolutions envisageables des concepts actuels d'entreposage à sec .....	11
5 EVOLUTIONS ENVISAGEABLES DES CONCEPTS DE TRANSPORT .....	13
6 CONCLUSION .....	14
ANNEXE 1 SAISINE.....	16

## Table des illustrations

Figure 1 : solutions d'entreposage en fonction de la puissance thermique du combustible utilisé .....	6
Figure 2 : courbes de décroissance de la puissance thermique des différents types de combustibles MOX utilisés par EDF .....	8
Figure 3 : décroissance de la puissance thermique des différents combustibles MOX selon leur date de déchargement du réacteur .....	9
Figure 4 : décroissance de la puissance thermique des différents combustibles URE selon leur date de déchargement du réacteur .....	10
Figure 5 : puissance thermique admissible pour les combustibles en fonction du nombre de logements laissés vides dans l'emballage .....	12
Figure 6 : relation, pour trois configurations de chargement hétérogène, entre la puissance thermique des assemblages les plus chauds et celle des assemblages les plus froids afin de garantir une température maximale de gaine inférieure à 400 °C.....	12

---

## RÉFÉRENCES

- [1] Lettre de la Commission nationale du débat public du 15 février 2019.
- [2] Rapport IRSN n°2018-00003 « Entreposage du combustible usé : concepts et enjeux de sûreté » - Juin 2018.
- [3] Rapport du Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire « Présentation du « Cycle du combustible » français en 2018 » - mise à jour du 21 septembre 2018.

# 1 PRÉSENTATION DE LA SAISINE

Dans le cadre de la préparation du débat public sur le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2019-2021 (PNGMDR 2019-2021), la Présidente de la Commission nationale du débat public (CNDP) a demandé à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), par lettre du 15 février 2019 [1] jointe en annexe 1 au présent rapport, deux expertises en vue de compléter l'information du dossier du maître d'ouvrage<sup>1</sup>. Ces expertises portent, d'une part sur l'entreposage à sec de combustibles nucléaires usés à base d'oxyde d'uranium et de plutonium (MOX) ou à base d'oxyde d'uranium de retraitement enrichi (URE), d'autre part sur l'état des lieux au niveau international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute activité à vie longue.

Le présent rapport concerne l'expertise relative à l'entreposage à sec ; le second volet de la saisine fera l'objet d'un rapport dédié.

La gestion des combustibles usés issus des réacteurs électronucléaires français, notamment leur entreposage, étant l'un des sujets abordés dans le PNGMDR 2019-2021, la Commission particulière du débat public (CPDP) mandatée pour le débat sur ce PNGMDR a, dans le cadre de la préparation de ce débat, pris connaissance du rapport de l'IRSN [2] consacré aux enjeux et concepts associés à l'entreposage du combustible nucléaire usé et publié en juin 2018 en réponse à une demande de la commission d'enquête parlementaire sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires en France. Dans ce rapport, l'IRSN illustre notamment les modes possibles d'entreposage des combustibles usés sur la base d'une courbe de décroissance de la puissance thermique de deux combustibles types, représentatifs :

- des chargements actuels des réacteurs d'EDF (combustible MOX et combustible à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi : UNE),
- des caractéristiques des concepts de transport et d'entreposage, sous eau ou à sec, actuellement mis en œuvre en France et dans le monde.

En particulier, en l'état actuel des moyens de transport et d'entreposage à sec, l'IRSN indique que la puissance des combustibles usés doit être inférieure à 6 kW pour permettre leur transport et à 2 kW pour permettre leur entreposage à sec.

La CPDP a relevé que ces valeurs sont déterminantes pour définir la durée minimale de refroidissement des combustibles usés avant transport ou mise en œuvre d'un mode d'entreposage à sec. Aussi, elle a souhaité que l'IRSN apporte des compléments portant, d'une part sur la compatibilité de l'entreposage à sec des combustibles MOX et URE actuellement entreposés sous eau, d'autre part sur les évolutions envisageables des moyens actuels de transport et d'entreposage à sec pour accroître les valeurs repères de puissance thermique précitées.

Ces points font l'objet du présent rapport de l'IRSN.

## 2 ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Dans le rapport « entreposage du combustible nucléaire usé : concepts et enjeux de sûreté » [2], l'IRSN examine les concepts d'entreposage, sous eau et à sec, existant à l'étranger et en France, ainsi que les enjeux de sûreté associés aux différentes solutions d'entreposage des combustibles usés : à sec ou sous eau, sur les sites des centrales nucléaires ou de manière centralisée. En conclusion de cet examen, l'IRSN retenait que le choix d'un type d'entreposage de combustibles usés doit être apprécié au regard des considérations suivantes.

---

<sup>1</sup> La maîtrise d'ouvrage est constituée de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), au sein du ministère de la Transition écologique et solidaire, et de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Les entreposages sous eau et à sec de combustibles usés ne répondent pas totalement aux mêmes besoins. L'entreposage en piscine est impératif pour les combustibles sortant du cœur du réacteur et peu refroidis. L'entreposage à sec convient bien aux combustibles très refroidis.

Le type de combustible utilisé, qu'il soit à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi (UNE), d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX) ou d'oxyde d'uranium de retraitement enrichi (URE), influe sur les dispositifs d'entreposage envisageables, au moins durant une certaine période de temps après leur déchargement. En particulier, les combustibles MOX présentent une puissance thermique significativement plus élevée que les combustibles UNE et URE, quelle que soit la période de refroidissement considérée.

L'IRSN a notamment illustré l'adéquation des solutions d'entreposage à la puissance thermique du combustible utilisé sous la forme d'une figure (cf. figure 1 du rapport [2]) pour deux combustibles types représentatifs de ceux actuellement mis en œuvre par EDF dans les réacteurs de 900 MWe du palier CPY, à savoir :

- un combustible constitué d'oxyde d'uranium naturel enrichi (UNE), initialement enrichi à 3,7 % en uranium 235 et irradié à 50 GWj/t<sup>2</sup> ;
- un combustible constitué d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium (MOX), de teneur moyenne en plutonium total de 8,65 % et irradié à 50 GWj/t.

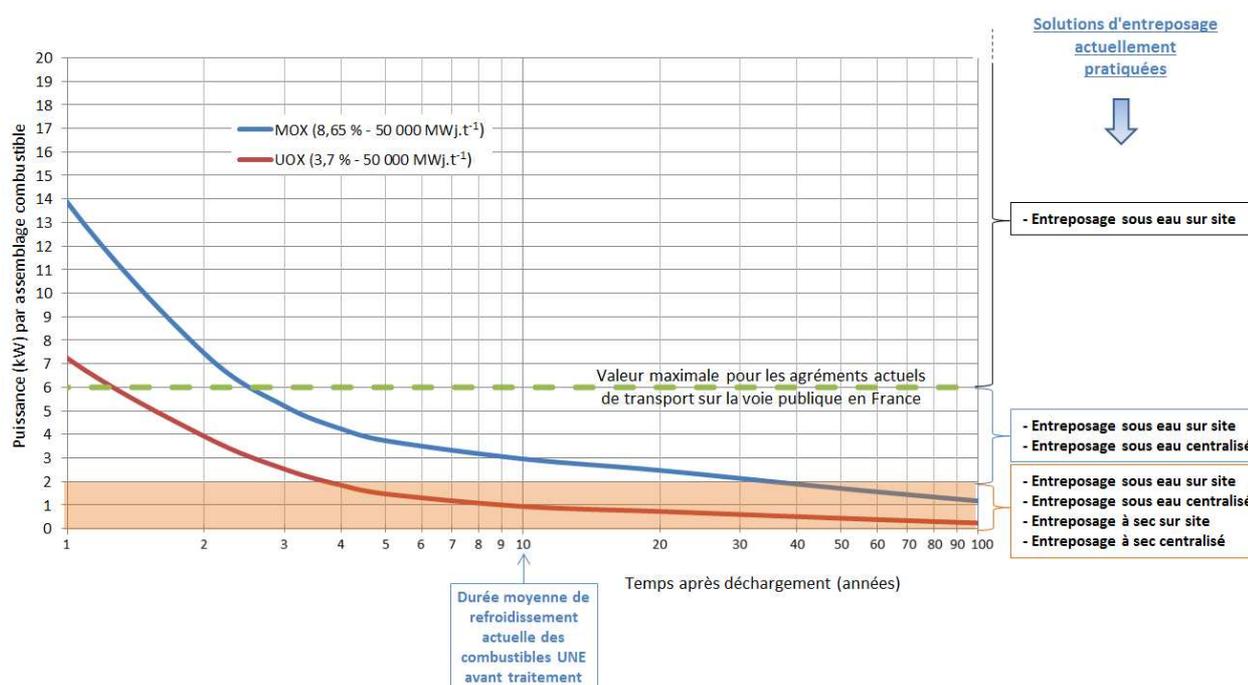


Figure 1 : solutions d'entreposage en fonction de la puissance thermique du combustible utilisé

Cette courbe s'articule notamment autour de deux valeurs repères :

- la puissance thermique maximale d'un combustible utilisé pouvant être transporté sur la voie publique, égale à 6 kW selon les agréments de transport en vigueur à ce jour en France ;
- la puissance thermique moyenne des assemblages combustibles la plus élevée, de l'ordre de 2 kW, associée aux concepts actuels d'entreposage à sec.

<sup>2</sup> Gigawatt jour par tonne : unité de taux de combustion du combustible donnant le niveau d'irradiation des assemblages combustibles, exprimée sous la forme de l'énergie extraite de l'assemblage en réacteur par tonne d'uranium initial.

Du point de vue de la sûreté, quel que soit le type d'entreposage, le paramètre déterminant est la puissance thermique des combustibles usés entreposés. À cet égard, les entreposages sous eau (c'est-à-dire en piscine), qui contiennent en général des combustibles plus chauds, nécessitent des dispositions de sûreté plus importantes que les entreposages à sec qui reposent sur des dispositions passives. Toutefois, dans ces derniers, les gaines (première barrière de confinement) sont plus sollicitées thermiquement et moins aisément contrôlables.

### 3 COMPATIBILITÉ DES COMBUSTIBLES USÉS MOX OU URE AVEC UN ENTREPOSAGE À SEC

Pour mémoire, les combustibles URE et MOX ne font actuellement pas l'objet d'un traitement et sont entreposés, après refroidissement dans les piscines des réacteurs d'EDF, dans les piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague. En effet, la stratégie actuellement affichée par EDF consiste à les entreposer sous eau et à les traiter le moment venu (après 2050), dans le but d'utiliser le plutonium dans de futures générations de réacteurs telles que les réacteurs à neutrons rapides (RNR) [3]. La durée d'entreposage de ces combustibles, leur devenir et donc leur destination finale dépendent des décisions sur le développement de ces nouvelles générations de réacteurs.

#### 3.1 Combustibles MOX usés

Comme indiqué précédemment, la courbe de décroissance de la puissance thermique du combustible MOX utilisé présentée dans le rapport IRSN de juin 2018 correspond au combustible MOX actuellement utilisé dans les réacteurs d'EDF (palier CPY), en considérant des caractéristiques enveloppes (taux de combustion maximal par exemple).

Il convient toutefois de rappeler que les caractéristiques des combustibles MOX utilisés par EDF dans ses réacteurs ont évolué au cours du temps, s'agissant de leur teneur en plutonium et de leur taux de combustion. Ainsi, depuis 1987, date de la première mise en œuvre de combustibles MOX, quatre périodes (cf. tableau 1) se sont succédé, entre lesquelles les caractéristiques du combustible MOX et le nombre de réacteurs concernés ont évolué.

Tableau 1 : évolution des caractéristiques des combustibles MOX et des réacteurs les utilisant depuis 1987

Période de chargement	1987 - 1994	1994 - 2000	2000 - 2007	Depuis 2007 *
Teneur moyenne en plutonium du combustible MOX	5,30 %		7,08 %	8,65 %
Taux de combustion moyen	36 GWj/t		39 GWj/t	46 GWj/t
Nombre de réacteurs concernés	6	20	20	22
Nombre de combustibles MOX concernés **	environ 1 200		environ 1 500	plus de 2 500

\* À noter qu'EDF prévoit dans l'avenir la mise en œuvre d'un combustible MOX de teneur moyenne en plutonium de 9,08 %.

\*\* Nombre de combustibles estimé à partir de la figure 14 - *Chronique de chargement du combustible MOX dans les réacteurs du parc* du rapport du Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire cité en référence [3].

Comme le montre la figure 2 ci-après, établie en considérant un taux de combustion moyen pour les combustibles, la décroissance de la puissance thermique diffère selon le type de combustible MOX. Ainsi, le temps de refroidissement de ces combustibles pour atteindre la valeur repère de 2 kW varie significativement. Par exemple, le combustible MOX à 5,30 % de plutonium est compatible avec un entreposage à sec après environ 5 ans de refroidissement, lorsque 10 ans (respectivement 30 ans) de refroidissement sont nécessaires pour celui à 7,08 % (respectivement à 8,65 %) de plutonium.

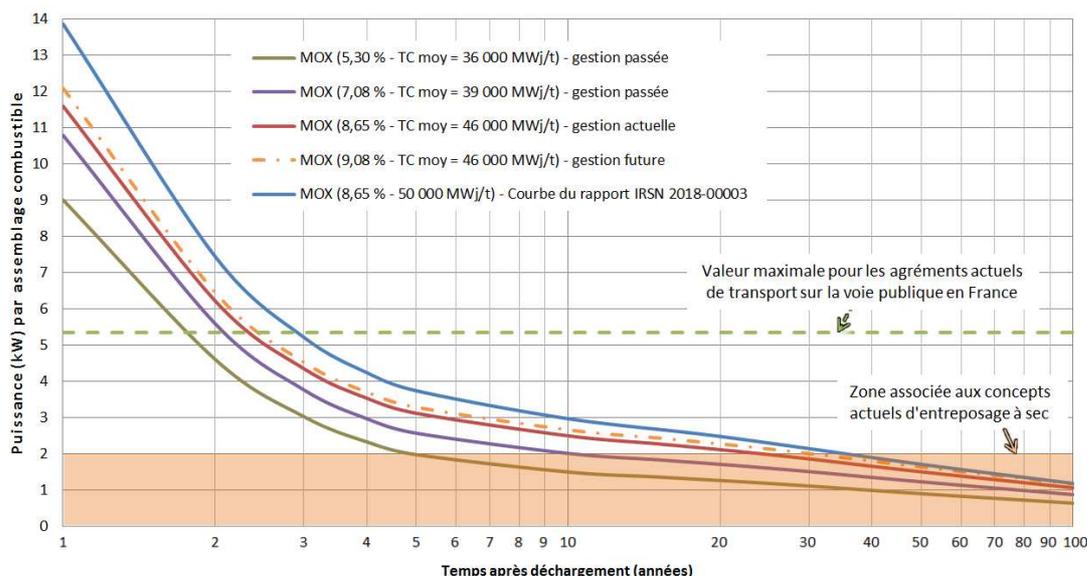


Figure 2 : courbes de décroissance de la puissance thermique des différents types de combustibles MOX utilisés par EDF

Ainsi, en tenant compte des dates de mise en œuvre des différents types de combustibles<sup>3</sup> et de la valeur repère de 2 kW, il apparaît que les combustibles MOX usés à 5,30 % de plutonium et la plupart de ceux à 7,08 % sont compatibles, du point de vue de l'évacuation de la puissance thermique, avec certains concepts d'entreposage à sec (cf. figure 3). Ceci représente de l'ordre de 2 500 combustibles usés.

En revanche, les premiers combustibles MOX à 8,65 % de plutonium usés ne seraient compatibles avec un entreposage à sec qu'à l'horizon 2040.

À cet égard, la figure 2 montre qu'une solution d'entreposage à sec qui serait conçue avec une puissance thermique maximale par assemblage de l'ordre de 3 kW permettrait l'entreposage de combustibles MOX à 8,65 % de plutonium usés après 5 à 10 ans de refroidissement.

Dans la suite de ce rapport, l'IRSN retient cette valeur de 3 kW comme valeur repère pour l'analyse d'évolutions des concepts d'entreposage à sec qui tendraient à réduire significativement la durée de refroidissement nécessaire avant entreposage à sec des combustibles MOX usés actuellement mis en œuvre.

<sup>3</sup> Les combustibles sont généralement déchargés des réacteurs après trois ans d'irradiation pour les combustibles MOX de teneurs en plutonium égales à 5,30 % et 7,08 % et après quatre ans pour les combustibles MOX à 8,65 % de plutonium.

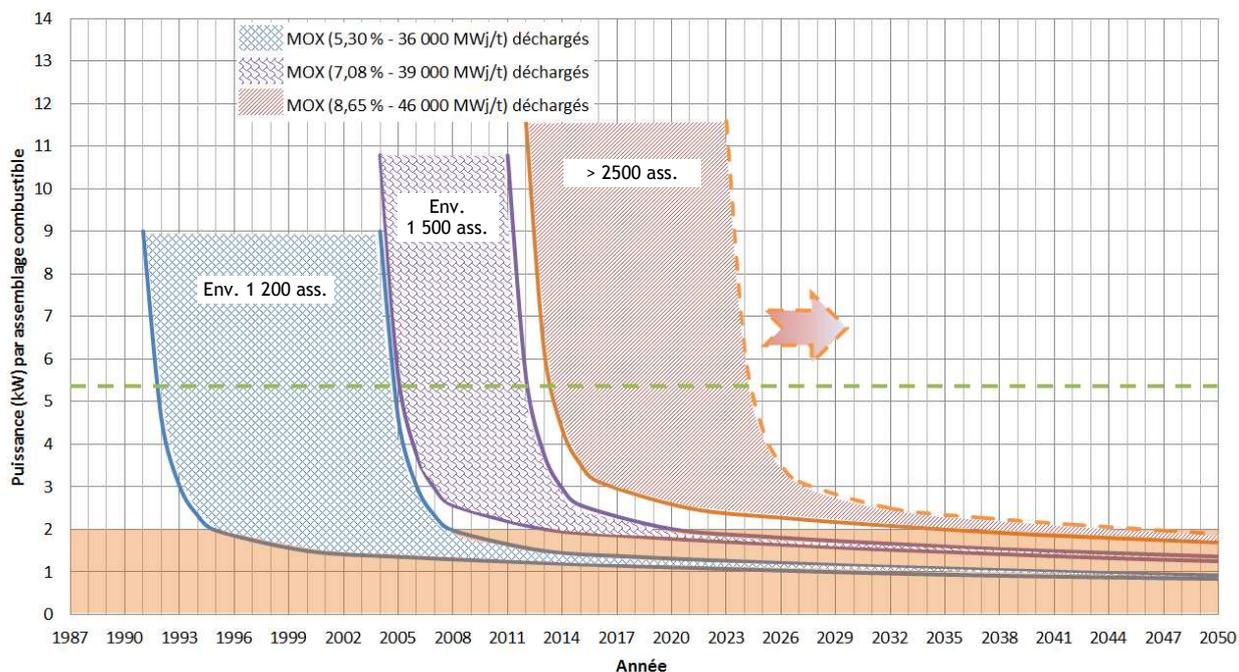


Figure 3 : décroissance de la puissance thermique des différents combustibles MOX selon leur date de déchargement du réacteur

### 3.2 Combustibles URE usés

Les combustibles URE ont été chargés entre 1994 et 2013 dans les réacteurs de 900 MWe du site de Cruas. EDF prévoit la reprise de l'utilisation de ce type de combustible en 2023 [3].

Comme pour les combustibles MOX, les caractéristiques des combustibles URE utilisés par EDF ont évolué au cours du temps, en termes d'enrichissement en isotope 235 de l'uranium et de taux de combustion. Ainsi, depuis la première mise en œuvre de combustible URE en 1994, trois périodes (cf. tableau 2) se sont succédé, entre lesquelles les caractéristiques et le nombre de réacteurs mettant en œuvre ce combustible ont évolué.

Tableau 2 : évolution des caractéristiques des combustibles URE utilisés depuis 1999

Période de chargement	1994 - 1999	1999 - 2009	2009 - 2013
Enrichissement en <sup>235</sup> U	3,70 %	4,10 %	
Taux de combustion moyen	46 GWj/t	46 GWj/t	
Nombre de réacteurs concernés	2	2	4
Nombre de combustibles URE concernés *	Environ 250	Environ 900	

\* Nombre de combustibles estimé à partir de la figure « *Quantité annuelle de combustible URE chargée à Cruas entre 1994 et 2013* » en annexe 6 du rapport du Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire cité en référence [3].

Les caractéristiques de puissance thermique des combustibles URE usés sont comparables à celles des combustibles URE. Comme illustré par la figure 4 ci-après<sup>4</sup>, l'ensemble des combustibles URE usés d'EDF est à ce jour compatible avec les concepts actuels d'entreposage à sec. Ceci représente environ 1 150 combustibles usés.

<sup>4</sup> Les combustibles URE sont généralement déchargés des réacteurs après trois ans d'irradiation.

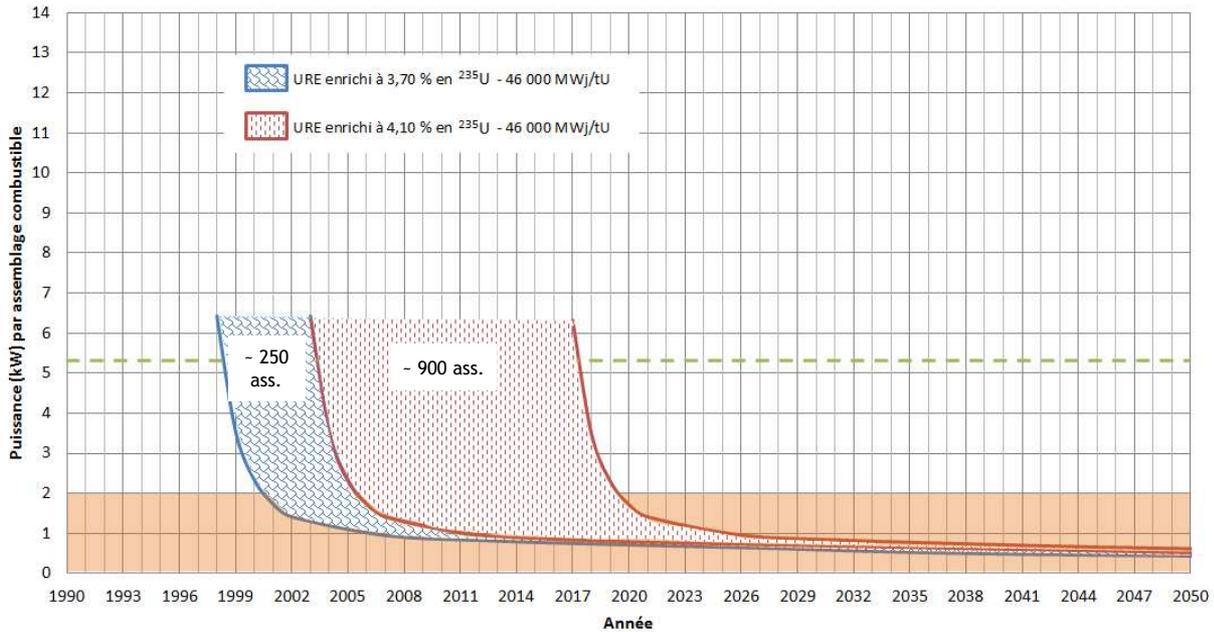


Figure 4 : décroissance de la puissance thermique des différents combustibles URE selon leur date de déchargement du réacteur

## 4 ÉVOLUTIONS ENVISAGEABLES DES CONCEPTS D'ENTREPOSAGE À SEC

### 4.1 Rappels sur les concepts actuels d'entreposage à sec

Dans les pays ne pratiquant pas le traitement des combustibles usés, les combustibles déchargés des réacteurs (majoritairement de type UNE) sont généralement, après un refroidissement en piscine de quelques années, placés dans des entreposages à sec. Ces entreposages sont conçus notamment pour garantir une température maximale des gaines des combustibles usés de l'ordre de 400 °C. Cela conduit, pour les dispositifs d'entreposage actuellement utilisés, à définir une puissance thermique maximale des combustibles entreposés comprise, selon les concepts, entre environ 1 kW et 2 kW. Ces valeurs permettent un entreposage à sec des combustibles UNE en tout état de cause avant 10 ans de refroidissement.

Comme décrit en détail dans le rapport IRSN cité en référence [2], trois principaux concepts d'entreposage à sec des combustibles usés ont été développés dans le monde :

- l'entreposage en casemates ou puits<sup>5</sup> ;
- l'entreposage en silos ;
- l'entreposage en emballages.

Les entreposages à sec, qu'ils soient réalisés sur le site du réacteur ou sur un site centralisé, requièrent un conditionnement préalable des combustibles usés, réalisé, selon le cas, en les plaçant :

- dans un panier introduit dans un emballage dont le système de fermeture est vissé ;
- dans un conteneur, le cas échéant préalablement équipé d'un panier, dont le couvercle est soudé de manière étanche ; le tout est ensuite placé dans une unité d'entreposage (puits, structure en béton horizontale ou verticale).

<sup>5</sup> Le terme anglais consacré est « vault storage », soit, textuellement, « entreposage en voûte » ; il apparaît plus explicite et approprié d'utiliser le terme « entreposage en casemate ».

## 4.2 Analyse des évolutions envisageables des concepts actuels d'entreposage à sec

À la demande de la CPDP, l'IRSN a examiné des évolutions envisageables des concepts actuels de transport et d'entreposage à sec qui permettraient de faire évoluer les valeurs repères précitées de puissance thermique des assemblages combustibles usés (2 kW pour l'entreposage à sec et 6 kW pour le transport).

Pour cet examen, l'IRSN a réalisé des études de sensibilité pour un concept d'entreposage à sec en emballage métallique pour lequel il disposait de données (géométrie, matériaux...) suffisantes pour établir rapidement un modèle de calcul. L'emballage retenu est constitué d'une virole épaisse en acier recouverte d'une résine destinée à limiter le débit de dose autour de celui-ci. Son enveloppe externe n'est pas munie d'un système spécifique (ailettes de refroidissement), destiné à augmenter la surface d'échange avec l'air extérieur et donc la dissipation thermique de l'emballage. Le panier placé dans celui-ci comporte 24 logements pouvant accueillir des combustibles usés. La puissance thermique maximale des combustibles usés entreposés dans cet emballage, en considérant un chargement complet et homogène (cas de référence), est un peu inférieure à 1,5 kW.

En première approche, l'IRSN considère que les conclusions de son étude peuvent être élargies à l'ensemble des concepts. Toutefois, les augmentations de puissance thermique des combustibles usés déduites de cette étude doivent être considérées comme des ordres de grandeur, celles-ci étant susceptibles de varier selon les concepts d'entreposage.

L'IRSN a principalement étudié des variantes des configurations de chargement de l'emballage retenu pour l'entreposage. Notamment, ont été examinés :

- des chargements incomplets : un ou plusieurs logements sont laissés vides, les logements utilisés contenant des combustibles usés de puissance thermique identique ;
- des chargements hétérogènes : l'emballage est chargé avec deux types de combustibles usés de puissances thermiques différentes.

Les paramètres des configurations alternatives étudiées (nombre et puissances thermiques des combustibles usés) sont définis de manière à retrouver la température maximale des gaines des combustibles usés du cas de référence (inférieure à 400 °C).

Les configurations de chargement incomplet présentent des gains importants en termes de puissance thermique maximale admissible pour les combustibles usés entreposés.

La figure 5 présente les différentes configurations de chargement incomplet pour lesquelles, à nombre donné de logements laissés vides dans l'emballage, le gain possible en termes de puissance thermique maximale par assemblage par rapport au cas de référence précité est le plus important.

Toutefois, elles conduisent à une diminution significative de la densité d'entreposage. Cela entraînerait une augmentation du nombre d'emballages nécessaire, de la surface des entreposages et le cas échéant des bâtiments les abritant. Ces évolutions iraient dans le sens d'une augmentation notable du coût de l'entreposage.

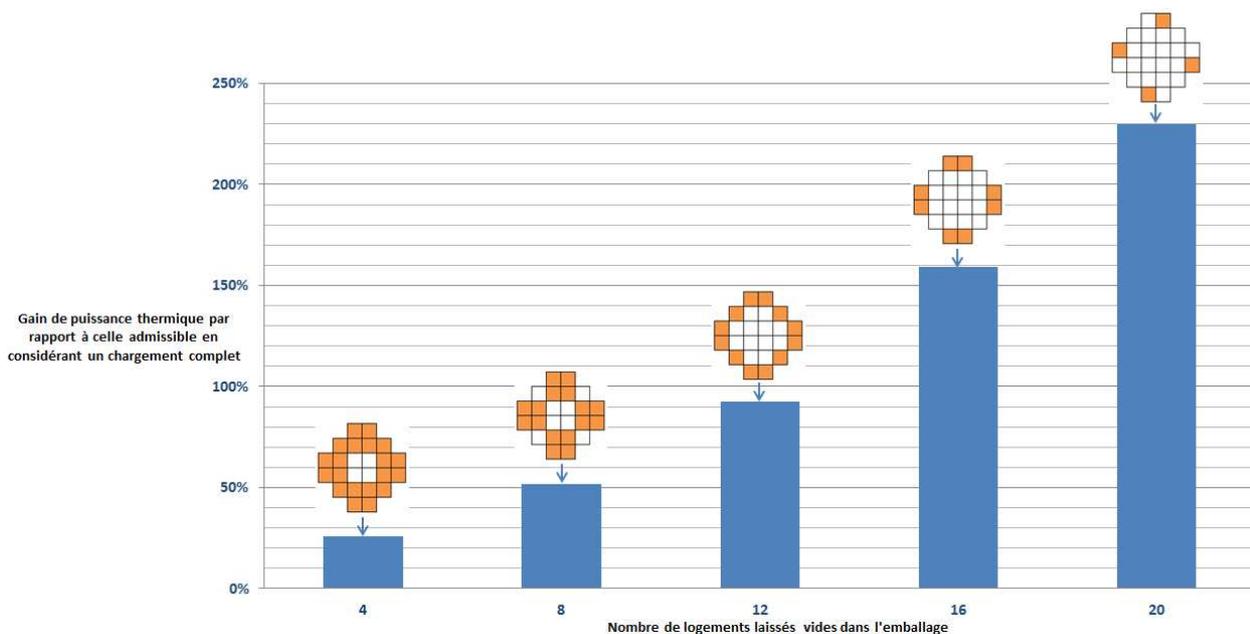


Figure 5 : puissance thermique admissible pour les combustibles en fonction du nombre de logements laissés vides dans l'emballage

Les configurations de chargement hétérogène présentent également des gains significatifs en termes de puissance thermique maximale admissible pour les combustibles usés entreposés par rapport au cas de référence. La figure 6 présente, pour trois cas de chargement hétérogène, les gains<sup>6</sup> de puissance thermique des assemblages les plus chauds en fonction de la réduction<sup>6</sup> de la puissance thermique des assemblages les plus froids (cf. l'exemple exposé dans l'encadré de la figure 6). En outre, elles n'entraînent pas de dégradation de la densité d'entreposage. Toutefois, elles nécessitent de disposer de combustibles usés présentant une puissance thermique plus faible, pour assurer le chargement complet des emballages. La stratégie française consistant à retraiter les combustibles UNE usés limite le recours à cette alternative.

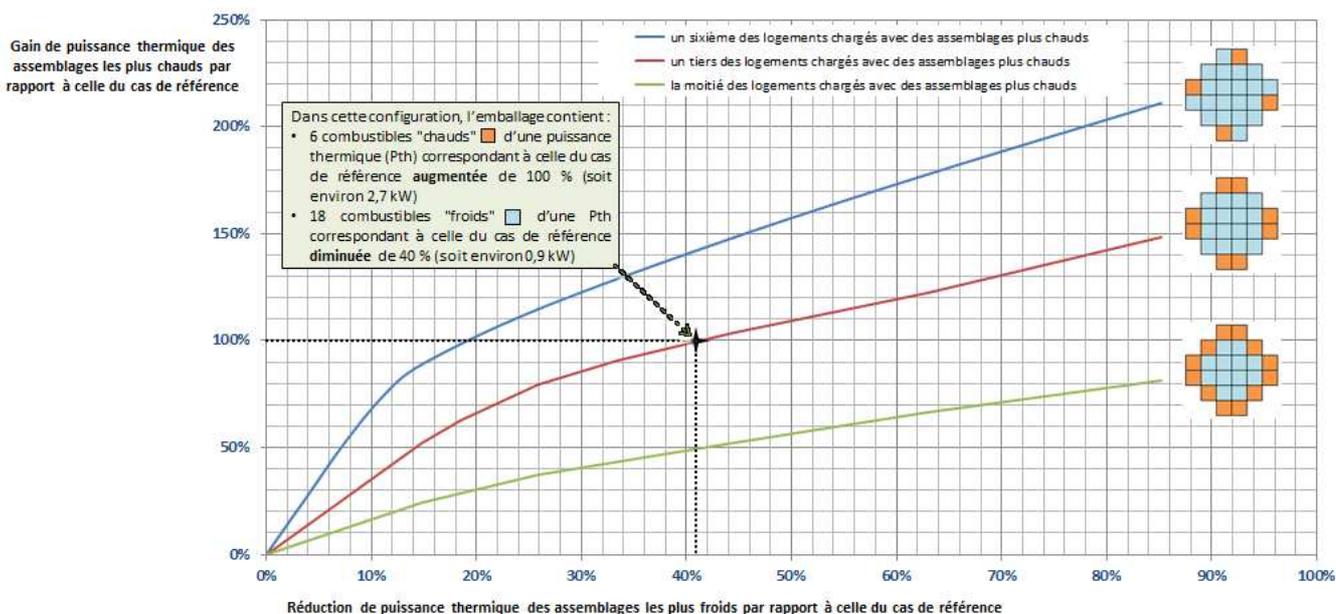


Figure 6 : relation, pour trois configurations de chargement hétérogène, entre la puissance thermique des assemblages les plus chauds et celle des assemblages les plus froids afin de garantir une température maximale de gaine inférieure à 400 °C

<sup>6</sup> Gain et réduction par rapport à la puissance thermique des assemblages pour le cas de référence

En conclusion, les résultats obtenus mettent en évidence que, en considérant uniquement le critère de température maximale de gaine des combustibles usés entreposés, il serait possible d'entreposer, dans l'emballage considéré pour l'étude, un nombre limité de combustibles usés d'une puissance thermique de deux à trois fois celle maximale du cas de référence (chargement complet et homogène de l'emballage). Ceci diminue significativement le temps de refroidissement sous eau nécessaire avant la mise en œuvre d'un entreposage à sec. À cet égard, la valeur repère de 3 kW, introduite au paragraphe 3.1 du rapport, apparaît atteignable.

Toutefois, la mise en œuvre industrielle des configurations étudiées devrait faire l'objet d'analyses (de sûreté et technico-économiques), notamment dans le contexte français. En effet, elles entraînent une baisse significative de la densité d'entreposage ou requièrent la disponibilité d'un nombre important de combustibles usés dont la puissance thermique est « faible ».

Par ailleurs, certains choix de conception des emballages peuvent favoriser les échanges thermiques entre les combustibles usés et l'environnement extérieur (ailettes de refroidissement par exemple). Ces dispositions permettraient d'augmenter la puissance thermique admissible pour les combustibles usés entreposés. À titre d'illustration, la mise en place d'ailettes de refroidissement autour de l'emballage modélisé par l'IRSN augmenterait de plusieurs dizaines de pourcents la puissance thermique maximale admissible pour les combustibles. Toutefois, cela peut entraîner une complexification de la fabrication de l'emballage, voire de l'entreposage afin de favoriser les échanges thermiques.

Enfin, outre l'exigence relative à la température maximale de la gaine des combustibles usés, les emballages doivent répondre à des exigences de radioprotection, en particulier lorsqu'il s'agit d'emballages utilisés à la fois pour les opérations de transport et d'entreposage. À cet égard, les résultats présentés ci-avant ne tiennent compte, ni des exigences de radioprotection (notamment celles liées au transport sur la voie publique), ni de la température maximale admissible de la résine classiquement utilisée pour ce type d'emballage.

La prise en compte de ces contraintes pourrait diminuer les gains estimés. Par exemple, dans le cas étudié par l'IRSN, les gains en termes de puissance thermique les plus importants sont obtenus en plaçant les combustibles les plus chauds dans les logements externes des paniers. Toutefois, cette configuration est la plus défavorable en matière de valeur de débit de dose autour des dispositifs d'entreposage, notamment compte tenu des débits de fluence neutronique<sup>7</sup> qui vont croissants avec la teneur en plutonium initiale dans le combustible.

## 5 EVOLUTIONS ENVISAGEABLES DES CONCEPTS DE TRANSPORT

Le concept d'entreposage étudié ci-dessus étant proche de celui des emballages de transport, les résultats obtenus sont transposables aux configurations de transport des combustibles usés (augmentation de la puissance thermique maximale admissible des combustibles usés pour des configurations de chargement incomplet ou hétérogène). Toutefois, dans ce cas, les exigences de radioprotection pourraient devenir plus limitatives que les exigences d'évacuation de la puissance thermique.

Aussi, les configurations de transport, voire les emballages, doivent pouvoir être adaptés pour transporter des combustibles dont la puissance thermique dépasse la valeur repère de 6 kW par combustible. Toutefois, selon la configuration retenue (chargement incomplet notamment), cela pourrait induire une augmentation du nombre de transports associés.

Comme pour l'entreposage, la mise en œuvre industrielle de telles évolutions devrait faire l'objet d'analyses (de sûreté et technico-économiques).

---

<sup>7</sup> Le débit de fluence correspond à la densité de flux neutronique.

## 6 CONCLUSION

Le combustible utilisé dans les réacteurs du parc électronucléaire français est constitué d'oxyde d'uranium naturel enrichi (UNE) ou d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX). Par le passé, du combustible constitué d'oxyde d'uranium de retraitement enrichi (URE) a été utilisé. À la différence des combustibles UNE, les combustibles URE et MOX ne font pas actuellement l'objet d'un traitement. Ils sont entreposés pour refroidissement dans les piscines des réacteurs d'EDF puis dans celles de l'établissement Orano Cycle de La Hague.

Les caractéristiques des combustibles MOX et URE utilisés par EDF ont évolué au cours du temps. En particulier, la teneur en plutonium des combustibles MOX a successivement été de 5,30 %, 7,08 % et 8,65 % (teneur des combustibles chargés à ce jour dans les réacteurs d'EDF).

La puissance thermique des combustibles MOX usés dépend de cette teneur et de leur taux de combustion. Ainsi, le temps de refroidissement nécessaire à ces combustibles pour que leur puissance thermique devienne inférieure à 2 kW par assemblage, valeur repère retenue par l'IRSN pour considérer possible la mise en œuvre des concepts actuels d'entreposage à sec, est respectivement de l'ordre de 5 ans, 10 ans et 30 ans en considérant le taux de combustion moyen par assemblage.

En conséquence, compte tenu des périodes durant lesquelles les combustibles MOX présentant les teneurs en plutonium précitées ont été mis en œuvre, des solutions d'entreposage à sec s'appuyant sur des concepts actuels pourraient, dès à présent, être envisagées pour l'ensemble des combustibles MOX usés de teneur en plutonium égale à 5,30 % et pour la plupart de ceux à 7,08 %, soit de l'ordre de 2 500 assemblages.

Pour les premiers combustibles MOX usés de teneur en plutonium de 8,65 %, mis en œuvre depuis 2007, il faudrait attendre environ 2040 pour pouvoir utiliser ce type d'entreposage. En tout état de cause, pour ce type de combustibles MOX usés, des solutions d'entreposages sous eau sont nécessaires sur une période proche de 30 ans après la fin de leur irradiation, en considérant la valeur repère de 2 kW associée aux concepts actuels d'entreposage à sec. Pour limiter cette période à une dizaine d'années, il faudrait disposer de concepts d'entreposage à sec conçus avec une puissance thermique par combustible usé de l'ordre de 3 kW.

Environ 1 150 combustibles URE ont été chargés dans des réacteurs par EDF entre 1994 et 2013. L'ensemble des combustibles URE usés actuellement entreposés ont une puissance thermique inférieure à 2 kW et sont donc compatibles avec les concepts actuels d'entreposage à sec.

La valeur repère de 2 kW retenue par l'IRSN pour la mise en œuvre d'un entreposage à sec est issue d'une analyse bibliographique des puissances thermiques moyennes des combustibles usés retenues pour les concepts d'entreposage à sec actuellement mis en œuvre dans le monde. Ces puissances, qui varient entre environ 1 kW et 2 kW, correspondent à des compromis entre les exigences de sûreté (température maximale de la gaine des combustibles usés, radioprotection...), la capacité d'entreposage (nombre de combustibles par dispositif d'entreposage), les caractéristiques des combustibles usés à entreposer (puissance thermique et donc temps de refroidissement) et les coûts.

En considérant uniquement l'exigence de sûreté relative à la température de la gaine des combustibles, des évolutions des configurations de chargement des concepts existants pour permettre d'entreposer des combustibles usés de puissance thermique supérieure à 2 kW sont possibles.

Ainsi, en réduisant par exemple le nombre de combustibles usés par dispositif d'entreposage ou en entreposant dans un même dispositif des combustibles de puissances thermiques hétérogènes (significativement supérieures et inférieures à la valeur moyenne), des combustibles usés de puissance thermique de deux à trois fois supérieure à la valeur moyenne associée aux dispositifs actuellement mis en œuvre pourraient être entreposés. Ceci diminuerait significativement le temps de refroidissement sous eau nécessaire avant la mise en œuvre d'un entreposage à sec. En outre, des évolutions de conception des dispositifs d'entreposage (amélioration de la dissipation thermique...) pourraient être développées.

Toutefois, la réduction du nombre de combustibles usés par dispositif d'entreposage diminue proportionnellement la densité d'entreposage (un chargement à moitié de l'emballage nécessite deux fois plus d'emballages et de surface d'entreposage pour le même nombre d'assemblages). De même, si les chargements hétérogènes n'entraînent pas de diminution de la densité d'entreposage, ils nécessitent de disposer de combustibles présentant une puissance thermique « faible ». La stratégie française consistant à retraiter les combustibles UNE usés limite le recours à cette alternative.

Une analyse analogue peut être réalisée pour les emballages de transport. Aussi, avec les pistes évoquées ci-dessus, les configurations de transport, voire les emballages, devraient pouvoir être adaptés pour transporter des combustibles dont la puissance thermique dépasse la valeur repère de 6 kW par combustible. Toutefois, selon la configuration retenue (chargement incomplet notamment), cela pourrait induire une augmentation du nombre de transports associés.

**Plus globalement, outre la contrainte liée à la température de la gaine des combustibles, les emballages doivent répondre à un ensemble d'exigences de sûreté et de radioprotection, ainsi qu'à des contraintes industrielles (faisabilité, capacité, coût...). Aussi, une analyse globale intégrant tous ces aspects serait nécessaire pour consolider les gains indiqués précédemment en tenant compte à la fois des opérations d'entreposage et, le cas échéant, de transport.**

De plus, les opérations à réaliser à l'issue de la phase d'entreposage, sous eau ou à sec, des combustibles usés doivent être prises en compte dès la conception de ces entreposages. Par exemple, les combustibles entreposés devront pouvoir être déchargés pour être, soit traités, soit reconditionnés en vue de leur stockage. Il conviendrait donc, dans un projet industriel d'entreposage à sec, d'identifier dès l'origine les installations nécessaires à ces opérations. En outre, des exigences de sûreté spécifiques seront à retenir pour ces opérations, par exemple concernant les caractéristiques mécaniques des combustibles usés après entreposage.

La démonstration du respect de ces exigences, en particulier pour les combustibles MOX usés, pourrait nécessiter des développements particuliers et le programme de surveillance des combustibles entreposés devra prendre en compte ces exigences. La définition et l'étude de l'ensemble de ces exigences ne seraient pas sans impact sur le délai de réalisation d'un éventuel premier entreposage à sec de combustibles MOX usés en France.

**En conclusion, l'analyse réalisée par l'IRSN ne fait pas apparaître d'éléments rédhibitoires à la possibilité d'entreposer à sec une partie des combustibles MOX et URE actuellement entreposés sous eau. Il conviendrait toutefois d'examiner les différentes options possibles, en intégrant les exigences de sûreté et de radioprotection afférentes ainsi que l'ensemble des contraintes industrielles.**



LA PRÉSIDENTE

Paris, le 15 FEV. 2019

Monsieur le Directeur général,

Pour faire suite aux échanges que vous avez eu avec Madame Isabelle HAREL-DUTIROU, Présidente de la Commission particulière du débat public PNGMDR, je vous confirme la demande de mise en place d'un partenariat avec l'IRSN. Afin de compléter l'information du dossier du maître d'ouvrage, il s'agirait de réaliser deux expertises :

**1. Expertise relative à l'analyse des possibilités d'entreposage à sec des combustibles radioactifs**

A la demande de la Commission d'enquête parlementaire sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, vous avez réalisé, en juin 2018, un rapport sur « l'entreposage du combustible nucléaire usé : concepts et enjeux de sûreté ». Dans ce rapport, vous illustrez les modes possibles d'entreposage des combustibles usés sur la base d'une courbe de décroissance de la puissance thermique de deux combustibles types, représentatifs des gestions de combustibles actuelles d'EDF, et des caractéristiques des concepts de transport et d'entreposage, sous eau ou à sec, actuellement mis en œuvre en France et de par le monde. En particulier, vous faites état, pour les entreposages à sec, d'une puissance maximale de 2 kW par assemblage combustible. Cette valeur est déterminante pour définir la durée minimale de refroidissement des assemblages combustibles usés avant mise en œuvre d'un tel mode d'entreposage.

En complément de ce rapport, et dans le cadre du débat public PNGMDR, nous souhaiterions disposer, pour début avril 2019, de votre analyse concernant :

-l'éventuelle compatibilité de certains combustibles usés MOX et URE actuellement entreposés sous eau avec un entreposage à sec ;

-les évolutions envisageables des concepts actuels de transport et d'entreposage à sec qui permettraient de revoir les valeurs repères de puissance thermique des assemblages combustibles usés mentionnées dans le rapport IRSN de juin 2018 (6 kW pour le transport et 2 kW pour l'entreposage à sec)".

Monsieur Jean-Christophe NIEL  
Directeur Général de l'IRSN  
BP 17  
92 262 FONTENAY-AUX-ROSES

## **2. Expertise relative à l'état des lieux au niveau international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets HA-VL**

Avec la loi de 2006, la France a décidé de retenir le stockage géologique profond comme solution de référence pour gérer sur le très long terme les déchets radioactifs les plus dangereux (déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue ou déchets HA-MAVL). Cette décision est intervenue à l'issue d'un processus d'évaluation de plusieurs options envisageables. Trois axes définis par la loi de 1991 ont été plus précisément explorés :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans les déchets de haute activité ;
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques ;
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.

Les résultats obtenus pour ces trois axes et les fondements du choix retenu dans la loi de 2006 sont présentés dans le dossier du maître d'ouvrage pour le débat public sur le plan national de gestion des déchets et des matières radioactives.

Le dossier du maître d'ouvrage indique : « le déploiement d'un stockage géologique profond présente des enjeux exceptionnels, de par sa durée qui s'étale sur quatre générations (un siècle environ). Un tel projet doit donc être conçu de façon à pouvoir intégrer, d'une part, les progrès technologiques et les évolutions de politique énergétique et, d'autre part, de répondre aux attentes de la société civile tout au long de sa vie. »

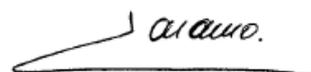
Afin de répondre à ces enjeux, le législateur a instauré un principe de réversibilité du stockage pour une durée d'au moins cent ans. La récupérabilité constitue l'une des formes prévues pour l'application de ce principe. Elle offre aux générations futures la possibilité de revenir sur le choix du stockage géologique profond comme mode de gestion des déchets radioactifs, en permettant de récupérer des colis de déchets déjà stockés et de mettre en œuvre une éventuelle solution alternative.

Afin de compléter l'information contenue dans le dossier du maître d'ouvrage et d'apprécier la vraisemblance d'une telle éventualité, il paraît important de disposer d'un panorama des différentes alternatives qu'il est aujourd'hui possible d'imaginer. Nous souhaiterions pour cela que vous rassembliez dans un document une description sommaire des principales options qui ont pu être explorées dans le passé au niveau international, ainsi qu'un état des recherches qui se poursuivent aujourd'hui dans le monde pour mettre au point des solutions de gestion des déchets HAVL alternatives au stockage géologique profond. Nous souhaiterions disposer de ce document pour début avril.

Je vous remercie à l'avance de l'engagement de votre institut dans cette démarche au service de la démocratie participative et de la transparence de l'information, valeurs communes à nos deux institutions.

Je vous prie de croire, Monsieur le Directeur général, à l'assurance de ma considération distinguée.

*Bien cordialement.*

  
Chantal JOUANNO

---

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS UTILISÉS DANS LE RAPPORT

ASN	Autorité de sûreté nucléaire
CNDP	Commission nationale du débat public
CNPE	Centre nucléaire de production d'électricité
CPDP	Commission particulière du débat public
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
EDF	Électricité de France
HCTISN	Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
MOX	Oxyde mixte d'uranium et de plutonium
MWe	Mégawatt électrique
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs
REP	Réacteur à eau pressurisée
RNR	Réacteur à neutrons rapides
Tmli	Tonne de métal lourd initial
UNE	Uranium naturel enrichi
UOX	Oxyde d'uranium
URE	Uranium de retraitement enrichi