

Partie I : Cycle du combustible

1 - Intérêts du traitement-recyclage pour la gestion des matières et déchets radioactifs.

1- a) Quels sont les arguments techniques en faveur, ou en défaveur, du mono-recyclage actuellement pratiqué en France du point de vue de la gestion des matières et déchets radioactifs?

La stratégie de traitement-recyclage des combustibles usés, mise en œuvre industriellement par la France il y a plus de 30 ans, constitue une première étape majeure dans la gestion durable des matières et des déchets radioactifs. Elle permet de traiter les combustibles à l'uranium naturel (UNE) usés, pour récupérer les matières valorisables (uranium et plutonium constituant respectivement 95% et 1% du combustible usé), tandis que seuls les autres composés (4% composés essentiellement de produits de la fission de l'uranium 235 et de certains transuraniens de moindre abondance encore appelés actinides mineurs) constituent les déchets ultimes.

Ainsi:

- L'intégralité du plutonium récupéré par traitement est recyclée en combustible MOX (pour mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium), aujourd'hui utilisable par 24 des 58 réacteurs du parc actuel ;
- L'uranium récupéré peut être ré-enrichi et rechargé en réacteur (combustible dit URE) (actuellement, 4 réacteurs du parc le permettent) ;
- Les déchets ultimes (produits de fission et actinides mineurs) sont aujourd'hui confinés dans une matrice de verre, coulés dans des conteneurs en acier et entreposés de manière sûre en puits, dans l'attente d'un stockage définitif ;
- Les combustibles MOX et URE usés sont entreposés en toute sûreté dans l'attente d'une valorisation ultérieure.

En chiffres, ce sont chaque année un peu plus de mille tonnes de combustibles usés qui sont traitées et dix tonnes de plutonium récupérées puis recyclées pour de nouveaux combustibles, dans les usines d'Orano. Par ailleurs, les technologies mises en œuvre ont des performances techniques excellentes, qu'il s'agisse des taux de récupération et de purification des matières valorisables uranium et plutonium (supérieures à 99,5%), du faible taux de déchets secondaires générés et d'une production de déchets vitrifiés dont la performance de confinement est inégalée.

Comparée à un parc ne recyclant pas ses matières, cette stratégie présente des atouts importants en termes:

- d'économie sur la ressource en uranium naturel (de l'ordre de 10% avec recyclage plutonium, pouvant atteindre 25% lorsque le recyclage de l'uranium est mis en œuvre) ;
- de diminution de la quantité totale de combustibles usés entreposés (les 1000 tonnes d'UNE déchargées chaque année sont mobilisées pour produire une centaine de tonnes de combustible MOX ; seuls ces derniers, et le cas échéant les combustibles URE usés, sont entreposés dans la durée) ; cumulé dans le temps, cela représente un entreposage évité de plus de 20 000 tonnes de combustibles

usés ;

- de diminution du volume de déchets de haute activité produits (de l'ordre d'un facteur 5 en volume) et de leur radiotoxicité (ceux-ci ne contenant pas de plutonium) et de conditionnement sûr de ces déchets.

Mais elle présente aussi certaines limites liées à la physique des neutrons, qui ne permet pas la mise en œuvre industrielle d'un recyclage récurrent (ou multi-recyclage) du plutonium et de l'uranium dans les réacteurs à eau actuels et ne permet donc pas, en l'état, de satisfaire l'ensemble des exigences d'une gestion durable des matières et déchets.

Par ailleurs, les combustibles issus de ce mono-recyclage (MOX/URE) sont, après utilisation et déchargement, entreposés. L'inventaire de ces combustibles continue de croître dans l'attente d'une valorisation ultérieure.

Une valorisation plus aboutie de ces matières, passant par la possibilité d'un recyclage récurrent, constitue donc un enjeu important des systèmes nucléaires de demain.

1 - Intérêts du traitement-recyclage pour la gestion des matières et déchets radioactifs.

1- b) Quels seraient les arguments techniques en faveur, ou en défaveur d'un éventuel multi-recyclage futur, et les conditions de sa faisabilité, du point de vue de la gestion des matières et déchets radioactifs?

Le multi-recyclage ajouterait aux mérites du recyclage actuel mentionnés plus hauts les avantages majeurs suivants :

- Il ouvre la voie à une valorisation complète du plutonium et de l'uranium de traitement, qui constituent une ressource énergétique s'ils sont associés à des réacteurs pouvant en tirer totalement profit. Les réacteurs du parc actuel ne recyclent qu'une seule fois le plutonium (avec le concept de MOX actuel) et l'uranium de traitement.
- Un gain supplémentaire sur le volume des déchets finaux à stocker serait associé. Tous les combustibles usés sont valorisés et seuls les déchets de haute activité confinés dans le verre contribuent alors au stockage définitif.

Les limites du recyclage actuel tiennent au fait que les combustibles MOX et URE usés sont entreposés sans traitement pour valorisation. Il s'agit d'une disposition temporaire dans l'attente d'un traitement et d'un recyclage, qui pourront être implantés à l'échelle industrielle une fois les conditions techniques et économiques réunies ; les matières issues de ce traitement, l'uranium et le plutonium, seront alors recyclées.

Les réacteurs à neutrons rapides présentent les caractéristiques techniques permettant de recycler le plutonium sans limitation et sans recours à l'uranium naturel enrichi. Ils sont à même de remplir pleinement les objectifs du cycle fermé. Ils ont bénéficié d'un retour d'expérience important dans le monde, en France en particulier avec les réacteurs Phénix puis Superphénix, et plus récemment, dans le cadre du projet ASTRID, de plus de 10 années d'études pour améliorer la technologie dans une démarche de progrès continue. Cette technologie est par ailleurs actuellement utilisée ou en cours de déploiement dans d'autres pays (principalement Russie, Chine) et étudiée au Japon.

Aux avantages cités plus hauts, le multi-recyclage associé à la technologie des réacteurs à neutrons rapides permettrait également de réduire la dépendance à l'uranium naturel, encore plus que ce que permet le mono recyclage actuel, par une valorisation durable de l'ensemble des matières produites aujourd'hui dans le cycle du combustible (plutonium et uranium de retraitement, uranium appauvri issu des opérations d'enrichissement de l'uranium naturel) ; dans une vision ultime, elle permet d'aller jusqu'à s'en affranchir totalement. Le multi-recyclage en REP, compte tenu de caractéristiques neutroniques différentes des réacteurs (spectres thermiques en REP), permet une économie de la ressource uranium qui reste limitée (à de l'ordre de 10% par rapport au mono-recyclage actuel).

Le multi-recyclage en RNR se traduit cependant par des quantités de combustibles au plutonium dans le cycle plus importantes qu'aujourd'hui, nécessitant des adaptations, potentiellement significatives, des procédés de traitement puis de fabrication

des combustibles. Pour assurer sa faisabilité, le multi-recyclage en réacteurs à neutrons rapides devra faire l'objet de démonstrations industrielles dans un réacteur de taille intermédiaire et dans des infrastructures du cycle dédiées, avant son éventuel déploiement à grande échelle.

Le multi-recyclage en REP constitue une voie à l'étude pour évaluer les mérites mais aussi les potentiels détriments de principe, et dont la faisabilité industrielle reste à explorer plus en profondeur (cf. fiche réponse à la question 2a).

2 - Unicité et crédibilité de la solution des réacteurs à neutrons rapides pour un éventuel multirecyclage

2 -a) Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) à caloporteur sodium sont-ils la seule voie pour multirecycliser le plutonium et sous quelles conditions ?

Les réacteurs à neutrons rapides présentent les caractéristiques techniques permettant de recycler le plutonium sans limitation et sans recours à l'uranium naturel enrichi. Ils sont à même de remplir pleinement les objectifs du cycle fermé.

Différentes familles de réacteurs à neutrons rapides sont étudiées dans le monde qui se distinguent tout d'abord par leur caloporteur, principalement le sodium, l'utilisation d'un gaz (helium), des sels fondus ou du plomb pur.

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ont fait l'objet de plusieurs réalisations dans le monde (USA, Japon, Royaume-Uni, Fédération de Russie, Inde et France) qui cumulent plus de 420 années de retour d'expérience. Cette filière a démontré sa maturité, et le retour d'expérience des incidents rencontrés montre qu'il est possible de gérer en toute sûreté les risques liés à l'utilisation du sodium. L'Inde est en train de mettre en service un réacteur de 500MWe (PFBR) et la Chine a démarré en décembre 2017 la construction d'un prototype de 600 MWe (CFR-600). L'enjeu des études en cours de recherche et développement est de poursuivre la conception d'un réacteur présentant des performances économiques améliorées tout en respectant les exigences actuelles en terme de sûreté.

Les caloporteurs plomb pur, sels fondus, gaz n'ont pas fait à ce jour l'objet de réalisation. Des prototypes sont à l'étude en Europe (par exemple Allegro pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz, Alfred pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb, MSFR réacteur à sels fondus porté par le CNRS en France), en Russie (BREST pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb). La maturité de ces technologies est au niveau de la faisabilité ; les programmes de recherche en cours visent à trouver des solutions technologiques permettant de justifier la faisabilité avant de lancer la réalisation d'un prototype.

Les réacteurs à neutrons rapides ne sont pas l'unique voie pour multi-recycler le plutonium. Le multi-recyclage dans les réacteurs à eau pressurisée du parc constitue une alternative faisant l'objet actuellement d'études. Ce concept n'est pas nouveau mais a fait l'objet récemment d'un certain regain d'intérêt. Le multi-recyclage en REP mettant en œuvre des combustibles au plutonium de nouvelle configuration, on parle ici de combustible de type CORAIL ou MIX, est en effet considéré, mais cela reste à démontrer, comme pouvant être implémenté dans des réacteurs de technologie voisine de celle du parc actuel. D'autres concepts tels que les réacteurs à haut facteur de conversion ou la purification isotopique ont été jugés de maturité industrielle insuffisante.

Si les options de multi-recyclage en REP permettraient théoriquement de multi-recycler le plutonium, leurs performances techniques en termes d'utilisation de la ressource en uranium naturel ou de production des déchets restent très en retrait des

performances atteintes par des réacteurs à neutrons rapides qui demeurent l'option la plus pertinente à terme dans un objectif de fermeture complète du cycle.

- Les évaluations théoriques du multi-recyclage des matières uranium et plutonium en REP, sous l'aspect gestion des matières et des déchets, montrent que les concepts d'assemblages CORAIL et MIX permettraient de stabiliser les inventaires de combustibles usés (MOX et URE) et de plutonium. Contrairement aux RNR, ils dépendent de la ressource uranium, comme le parc REP actuel, en dépit d'une économie supplémentaire de l'ordre d'une dizaine de % comparé au mono-recyclage de l'uranium et du plutonium, lorsque le recyclage de l'uranium de traitement est mis en œuvre. Le multi-recyclage en REP se caractérise par une augmentation significative des actinides mineurs par rapport au multi-recyclage en RNR (+100%), mais aussi par rapport au mono-recyclage actuel (+30%) et de manière corrélée par une augmentation du nombre de colis de verre de haute activité et à vie longue (de l'ordre de +50% par rapport aux RNR).
- Le comportement en cœur ainsi que le comportement des cœurs de transition doivent également faire l'objet d'études d'ingénierie complémentaires, de démonstrations de sûreté notamment et d'adaptations industrielles éventuellement nécessaires. La possibilité de réversibilité des concepts en cas d'indisponibilité des infrastructures du cycle à produire les combustibles issus des matières recyclées (possibilité de recourir alors à du combustible UNE) doit également être validée pour répondre aux exigences de sécurité d'approvisionnement du parc. La complexification du cycle en multi-recyclage REP par rapport au mono-recyclage doit être évaluée au regard d'hypothèses de flux affinées sur les matières recyclées (triplement des quantités annuelles de combustibles au plutonium recyclées), de l'analyse approfondie de faisabilité industrielle et des progrès technologiques à mettre en œuvre pour les usines du cycle. Les développements sur les technologies du cycle pourraient toutefois représenter une étape intermédiaire dans le cas d'une mise en œuvre transitoire entre le mono-recyclage actuel et un déploiement ultérieur de RNR.

2 - Unicité et crédibilité de la solution des réacteurs à neutrons rapides pour un éventuel multirecyclage

2 - b) D'un point de vue purement technique, et dans l'hypothèse où l'État le souhaiterait, des RNR industriels, inspirés éventuellement du démonstrateur ASTRID, pourraient ils être déployés dans les prochaines décennies avec un niveau de sûreté équivalent ou supérieur à celui des réacteurs de 3^{ème} génération (EPR) ?

Des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium industriels peuvent être déployés avec un niveau de sûreté équivalent voire supérieur à celui des réacteurs de 3^{ème} génération.

Cette famille de réacteurs a des mérites intrinsèques de la filière RNR-Na dû aux bonnes propriétés thermique du sodium et de sa faible viscosité :

- l'architecture dite à circuit primaire intégrée (utilisée pour Phénix, Superphénix et les réacteurs russes et indiens) permet, en particulier, une très bonne mise en route de la circulation naturelle du caloporteur et une élimination en pratique du risque de dénoyage du cœur ou de la perte des systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle ;
- le circuit primaire n'est pas pressurisé et possède une grande inertie thermique offrant des délais importants aux opérateurs pour intervenir en cas de perte de refroidissement et une forte protection en cas de fuite sur le circuit primaire ;
- la marge, en fonctionnement, vis-à-vis de la température d'ébullition du sodium est très grande, typiquement 300°C ;
- le pilotage du réacteur se révèle aisé, du fait de l'absence de poisons neutroniques (pour compenser les excès de réactivité) contrairement aux REP, de l'absence d'effet d'empoisonnement par des produits de fission très absorbants neutroniquement tels que le xénon ou le samarium dans les REP, et des contre-réactions thermiques auto-stabilisantes ;
- des systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle, actifs ou passifs, utilisant deux types de sources froides, air et eau, ont démontré leur efficacité ; la source froide air est toujours disponible ;
- le sodium liquide est très peu corrosif et peu activé par les neutrons ;
- le bilan environnemental est très positif et la dose collective aux travailleurs est très basse comparée à d'autres types de réacteurs (à Phénix, sur les 36 années de fonctionnement, la dose annuelle moyenne reçue par agent est de 0,05 mSv/an, à comparer à l'irradiation naturelle - hors médical et activités humaines) de 2,5 mSv/an.

Les inconvénients du sodium liquide sont connus : sa réactivité à l'eau et à l'air ainsi que son opacité. Le retour d'expérience d'exploitation des réacteurs français montre que des parades efficaces ont été mises au point en terme de prévention et de gestion des fuites. Tous les incidents n'ont eu qu'un impact sur la disponibilité du réacteur et aucune conséquence sur la sûreté. L'opacité du sodium implique le développement de moyens de visualisation par ondes ultrasonores pour certaines opérations d'inspection, qui est un axe majeur de la R&D actuelle.

Dans le cadre du programme ASTRID, les études ont permis de proposer un certain nombre d'innovations, qui permettent de considérer accessible l'atteinte des objectifs de sûreté au moins équivalents à ceux fixés aux réacteurs EPR, tout en tenant compte du retour d'expérience de Fukushima et des spécificités liées à l'utilisation du sodium.

Les innovations consistent en particulier dans :

- un nouveau design du cœur du réacteur, naturellement résistant aux transitoires accidentels et diminuant fortement le risque d'occurrence d'une dégradation du combustible,
- un circuit tertiaire sans eau de manière à supprimer les risques de réaction chimique entre le sodium et l'eau ou bien de dispositions pour renforcer la prévention et la maîtrise de celles-ci,
- un récupérateur de cœur fondu intégré à la cuve du réacteur et dimensionné pour un accident hypothétique de fusion globale du cœur,
- une diversification accrue des systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle utilisant deux sources froides (eau et air) comme moyen de refroidissement, dans un objectif d'élimination en pratique de la perte de la fonction de refroidissement en cas de perte des alimentations électriques et de la source froide en eau,
- des dispositions de détection précoce de fuites réduisent fortement les risques de feu de sodium,
- de développement de moyens d'inspection en service sous sodium pour vérifier l'absence de défaut critique.

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium seront labellisés « GEN IV ». Comme les réacteurs de 3^{ème} génération, dont les objectifs de sûreté ambitieux peuvent être considérés comme des références, les réacteurs de 4^{ème} génération répondront aux plus hautes exigences de sûreté du moment, s'appuyant sur une robustesse accrue des démonstrations de sûreté.

La R&D menée par le CEA avec ses partenaires visent à proposer des options de conception afin de pouvoir concevoir, exploiter puis démanteler un réacteur industriel répondant aux critères économiques du moment permettant le déploiement d'une filière, tout en répondant de manière robuste aux exigences de sûreté.

2 - Unicité et crédibilité de la solution des réacteurs à neutrons rapides pour un éventuel multirecyclage

2 - c) Si oui, à quel coût et pour quelle échéance ? En particulier, quelle échéance avec le financement de recherche actuel et quel financement nécessaire si l'État décidait d'un déploiement anticipé ?

3 - Entreposage du combustible usé.

3 - a) Compte tenu de la puissance installée actuelle des réacteurs et de la production actuelle de combustible usé, une nouvelle solution d'entreposage est-elle nécessaire et si oui à quelle échéance?

3 - b) Quels sont les mérites intrinsèques des différentes formes d'entreposage du combustible usé (à sec ou en piscine, centralisé ou sur site) ?

3 - c) En admettant qu'un nouvel entreposage soit nécessaire, quelle forme d'entreposage (à sec ou en piscine, centralisé ou sur site) est-elle la plus adaptée à la situation française ?