

Très hauts taux de combustion dans les réacteurs à eau légère

K. Hesketh, C. Nordborg *

Au fil du temps, le taux de combustion moyen au déchargement des réacteurs à eau ordinaire (REO) a été relevé au fur et à mesure des progrès technologiques. La limite pratique se situe aujourd'hui aux alentours de 50 gigawatt-jours par tonne de métal lourd initial (GWj/t). Cette hausse a principalement pour origine la volonté d'abaisser les coûts du cycle du combustible et de tirer parti de la souplesse de fonctionnement supplémentaire qu'autorisent ces taux de combustion. La tendance va-t-elle se poursuivre ou y a-t-il des limites scientifiques et technologiques à l'augmentation du taux de combustion des combustibles des REO ?

Un groupe d'experts de l'AEN a effectué une évaluation technique des cycles du combustible à très haut taux de combustion dans les réacteurs à eau ordinaire d'aujourd'hui pour une plage de taux au déchargement situé entre 60 GWj/t et 100 GWj/t environ. Il s'agissait d'étudier les répercussions de tels taux sur le cycle du combustible, l'exploitation et la sûreté du réacteur et l'économie du cycle du combustible. Cet article résume les conclusions du rapport que vient de publier l'AEN¹.

Amont du cycle du combustible

Pour atteindre de très hauts taux de combustion, il faut, et c'est là le plus important, assouplir la limite actuelle de 5,0 % fixée pour le taux d'enrichissement applicable dans les usines de fabrication du combustible modernes et pour le transport de combustible neuf. Cette limite est pénalisante surtout pour

les réacteurs à eau bouillante (REB) où la répartition des taux d'enrichissement est hétérogène et où les crayons combustibles les plus enrichis doivent rester en dessous de la limite des 5,0 %.

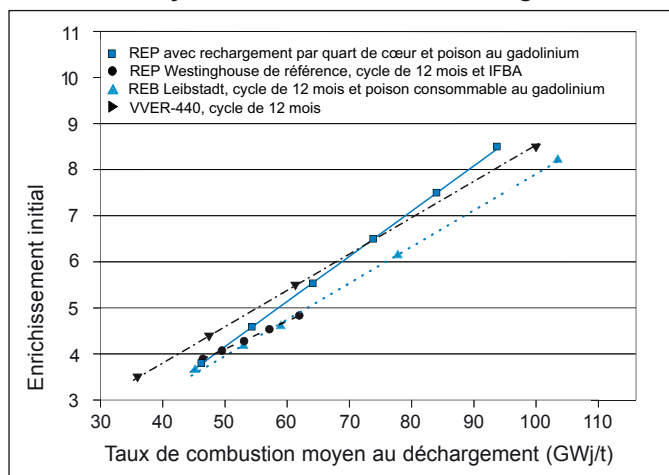
Le taux de combustion moyen le plus élevé que l'on puisse obtenir avec un combustible respectant la limite du taux d'enrichissement à 5,0 % se situe autour de 65 GWj/t, et l'enrichissement doit passer à 8,0 % si l'on veut atteindre un taux de combustion de 100 GWj/t dans des réacteurs à eau sous pression (REP). Toutefois, pour atteindre ce taux, l'enrichissement maximal de crayon combustible des assemblages de REB devra être relevé (jusqu'à environ 10 %) à cause de la répartition hétérogène des taux d'enrichissement nécessaire pour compenser les pics de flux locaux. La Figure 1 représente la relation linéaire entre l'enrichissement initial et le taux moyen de combustion au déchargement pour divers cycles de combustible REP. Elle montre clairement que le taux de combustion maximum se situe à 65 GWj/t au taux d'enrichissement plafond de 5,0 %, et donne une valeur plus faible pour les REB puisque le taux d'enrichissement moyen y sera nécessairement inférieur à 5,0 %. Les enrichissements supérieurs nécessaires pour obtenir des taux de combustion plus élevés auront un impact significatif sur les usines de fabrication du combustible ainsi que sur le transport de ce dernier.

Stratégies de gestion du combustible et leurs conséquences sur la conception et la sûreté du cœur du réacteur

L'AEN a étudié les répercussions des très hauts taux de combustion sur la gestion du combustible dans le cœur ainsi que sur les caractéristiques de conception et de sûreté d'un réacteur. Bien que les détails spécifiques varient avec la filière de réacteur (REP, VVER ou REB), des calculs ont été effectués

* M. Kevin Hesketh (Kevin.W.Hesketh@nexiasolutions.com) est membre du Comité des sciences nucléaires (NSC) de l'AEN et Président du Groupe de travail sur les aspects scientifiques des réacteurs (WPRS) du NSC ; M. Claes Nordborg (claes.nordborg@oecd.org) est Chef de la Section des sciences nucléaires de l'AEN.

Figure 1. Relation entre l'enrichissement initial du combustible (pourcentage de ^{235}U) et le taux moyen de combustion au déchargement



sur un réacteur VVER-440 afin d'illustrer les deux stratégies de gestion du combustible étudiées :

- La première consiste à abaisser la proportion de combustible rechargé sans modifier la durée du cycle ni la puissance du réacteur. À titre indicatif, on a pu passer d'un rechargement par tiers à un rechargement par quart, c'est-à-dire que le combustible reste en réacteur, non plus durant trois cycles, mais quatre. Pour une durée fixe du cycle, l'augmentation du taux de combustion au déchargement est inversement proportionnelle à la proportion de combustible rechargé.
- L'autre manière, à savoir augmenter la longueur du cycle tout en maintenant constant la proportion de rechargement pourrait se révéler plus avantageuse économiquement. À durée d'indisponibilité pour rechargement équivalente, l'allongement des cycles induit des facteurs de charge supérieurs et permet une augmentation des recettes de la production d'électricité. Dans ce cas, le taux de combustion au déchargement est directement proportionnel à la longueur du cycle.

Quelle que soit la solution choisie, il faut, pour augmenter le taux de combustion au déchargement, un enrichissement initial supérieur. Ce relèvement du taux d'enrichissement modifie profondément la gestion du combustible dans le cœur dans les deux cas, et il faut veiller à s'assurer que les paramètres du cœur, pic de puissance, coefficient de réactivité et marges de sûreté à l'arrêt restent dans des limites acceptables. On peut également atteindre des taux de combustion plus élevés au déchargement en augmentant le niveau de puissance du réacteur. À supposer que la proportion de combustible rechargé et la durée d'un cycle restent identiques,

le taux de combustion augmente avec la puissance du réacteur.

Pour ce qui est de la conception du cœur et de la sûreté lorsque l'on recherche de hauts taux de combustion moyens, il a été démontré, avec des taux d'enrichissement moyens en ^{235}U élevés, que :

- Le coefficient de température du modérateur devient plus négatif.
- Le coefficient de réactivité du bore devient moins négatif.
- Il y a une réduction d'efficacité des barres de commande réduisant les marges de sûreté à l'arrêt.

Ces légers inconvénients pour les paramètres de conception et de sûreté nucléaires à des taux de combustion très élevés sont, pour la plupart, gérables. Toutefois, il conviendra d'étendre aux très hauts taux de combustion les travaux de validation expérimentale ainsi que la validation des bibliothèques de données nucléaires et des méthodes de conception de cœur.

Concernant l'irradiation de la cuve du réacteur, on a noté que les modes de chargement consistant à placer les éléments combustibles les plus enrichis à la périphérie du cœur réduisent très efficacement la fluence au niveau de la cuve. Toutefois, ce schéma de chargement peut poser des problèmes en raison des pics radiaux de puissance aux très hauts taux de combustion.

Fonctionnement des réacteurs et comportement thermomécanique du combustible

L'impact des très hauts taux de combustion sur la thermohydraulique du réacteur et le comportement thermomécanique du combustible ont été également étudiés. Pour ce qui concerne la thermohydraulique, il faudrait parvenir à mieux comprendre les effets de la corrosion, de l'accumulation de dépôts et des distributions axiale et radiale de puissance sur le flux thermique critique à ces taux de combustion et recueillir des mesures sur les gainages conçus pour ces hauts taux de combustion. Il sera nécessaire de vérifier la précision des modèles de température en régimes permanents et transitoires à ces taux de combustion, et l'on aura peut-être besoin pour cela d'adapter la conception des assemblages.

L'augmentation du taux de combustion affecte tous les aspects du comportement thermomécanique du combustible et notamment la réorganisation des pastilles de combustible, le relâchement de gaz, la corrosion du gainage et la stabilité dimensionnelle. Les alliages mis au point récemment pour le gainage, par exemple, ont une

résistance à la corrosion nettement supérieure aux taux de combustion élevés, comme le montre la Figure 2. Étant donné que l'expérience acquise à ce jour sur le comportement du combustible n'est pas transposable à ces très hauts taux de combustion, il faudra valider de manière approfondie les codes de calcul du comportement du combustible, le cas échéant, à l'aide de nouveaux principes théoriques et d'essais d'irradiation coûteux pour démontrer que le combustible a un comportement satisfaisant.

Aval du cycle du combustible

Les combustibles à très haut taux de combustion produisent davantage de chaleur de décroissance et de neutrons en raison de la quantité supérieure d'actinides mineurs qu'ils contiennent, toutes choses qui ont des conséquences négatives sur les évaluations de la criticité et la gestion du combustible usé, notamment le transport, l'entreposage et le retraitement.

Avec l'irradiation, la composition isotopique de l'uranium et du plutonium se dégrade, ce qui peut avoir des implications sur les usines de retraitement dont il est parfois nécessaire de modifier la conception voire les modes d'exploitation. À titre d'exemple, l'inventaire en ^{232}U du combustible irradié augmente fortement avec le taux de combustion, modifiant, de ce fait, les doses reçues par le personnel des usines de fabrication du combustible, puisque la chaîne de décroissance du ^{232}U contient un isotope (^{208}Tl) qui émet un rayonnement gamma très intense.

La composition isotopique du plutonium récupéré des combustibles à très haut taux de combustion sera de moindre qualité fissile, ce qui aura des conséquences particulières pour le recyclage du plutonium sous forme de MOX dans les réacteurs thermiques. On aura en effet besoin d'augmenter la concentration initiale en plutonium si sa qualité fissile est médiocre. De plus, pour éviter un coefficient de vide positif, il ne faudra pas dépasser une teneur totale en plutonium de 12% dans le combustible MOX. La valeur maximale du taux de combustion moyen au déchargement que l'on puisse atteindre si l'on respecte cette limite de 12%, avoisine 75 GWj/t suivant la composition isotopique du plutonium utilisé. C'est donc une limite potentielle au recyclage du MOX que l'on pourrait éventuellement contourner avec des conceptions innovantes.

Un autre facteur est la quantité de déchets de haute activité que l'on peut placer dans des matrices de verre et qui, dans les installations actuelles, est limitée par l'émission de neutrons. Le fait que les combustibles portés à de très hauts taux de combustion contiennent davantage de

^{244}Cm pourrait imposer une baisse de ce taux d'incorporation et inversement accroître les volumes de déchets vitrifiés.

Si la radiotoxicité du combustible irradié, mesurée en sieverts par tonne de métal lourd (Sv/tML) augmente avec le taux de combustion, il faut tenir compte aussi du fait que chaque tonne de combustible produit davantage d'énergie à ces taux de combustion élevés. En fin de compte, la radiotoxicité du combustible usé paraît pratiquement indépendante du taux de combustion si on l'exprime en sievert par térajoule d'électricité produite.

Le combustible à haut taux de combustion pourrait se révéler très intéressant pour une entreprise d'électricité au stade de l'entreposage du combustible usé. Le doublement du taux de combustion au déchargement diviserait en effet par deux le volume de combustible usé accumulé sur la durée de vie d'un REO. Toutefois, la chaleur de décroissance et l'émission de neutrons plus importantes dans le cas des combustibles à haut taux de combustion rallongeront le temps de refroidissement. Par conséquent, en multipliant par deux le taux de combustion, on ne double pas nécessairement la capacité effective d'entreposage, l'allongement du temps de refroidissement venant contrebalancer le nombre inférieur d'assemblages combustibles que l'on décharge chaque année.

On ignore si le stockage direct des combustibles à très haut taux de combustion dans un dépôt en formation géologique pourrait avoir des conséquences négatives sur l'intégrité et les taux de fuite des colis de déchets à long terme. Les implications pour les procédés de conditionnement des combustibles usés avant leur stockage sont tout aussi mal connues.

Économie

Bien que certains pays aient déjà déterminé les concepts et stratégies qu'ils appliqueront pour l'aval du cycle et ne puissent pas augmenter les taux de combustion à volonté, la majorité des exploitants de REO ont d'excellentes raisons d'adopter des cycles à très haut taux de combustion. Dans certaines situations, ces très hauts taux permettront une économie sur les coûts du cycle que les producteurs d'électricité apprécieront particulièrement. Les coûts du cycle du combustible sont en effet un facteur sur lequel les producteurs d'électricité peuvent influencer directement, ce qu'ils ne manqueront pas de faire car nombreux sont ceux qui, opérant sur des marchés libéralisés, subissent une très forte concurrence.

Pour bon nombre d'entre eux, les baisses directes des coûts du cycle du combustible passeront toutefois après la réduction des quantités de combustible

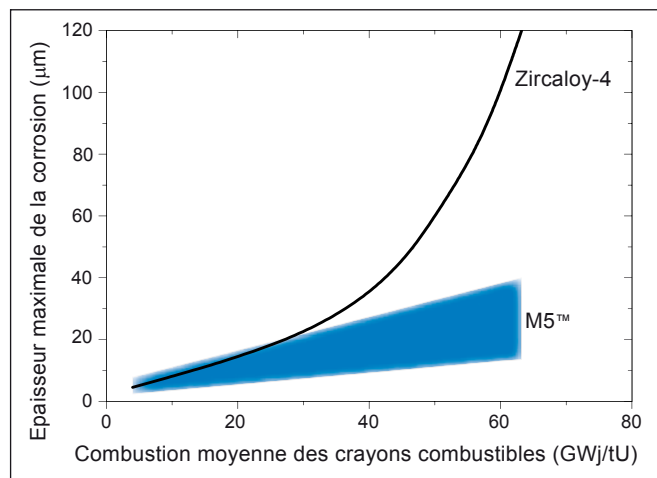
usé produites. Les producteurs d'électricité ont souvent des contraintes d'exploitation très strictes, notamment une capacité limitée d'entreposage du combustible usé qui exige une gestion très pointue pour optimiser la durée de vie en service des installations. Pour les entreprises qui se trouvent dans cette situation, la possibilité de produire moins de combustible usé grâce aux très hauts taux de combustion peut être un moyen d'optimiser les recettes de la production sur toute la durée de vie de l'installation et constituer de ce fait un avantage économique considérable. Les très hauts taux de combustion offrent aussi à l'entreprise davantage de souplesse pour optimiser le couple durée du cycle/proportion de combustible rechargé et, éventuellement, en tirer d'importants avantages économiques et opérationnels.

À des taux de combustion au déchargement de l'ordre de 60 à 100 GWj/t, l'évaluation des coûts du cycle du combustible n'a pas révélé un avantage économique déterminant. L'intérêt de continuer à augmenter le taux de combustion n'est véritable que dans un modèle économique sans actualisation et cela seulement si l'on admet que les coûts unitaires en fin de cycle n'augmentent pas trop rapidement avec le taux de combustion. Avec les modèles économiques actualisés, au contraire, les taux de combustion plus élevés ne deviennent intéressants dans l'étude que dans le modèle prévoyant une relation optimiste entre l'enrichissement initial et le taux moyen au rechargement (c'est-à-dire dans le cas où la durée du cycle reste constante et la proportion de combustible rechargé diminue) et lorsque les coûts unitaires de l'aval du cycle sont indépendants du taux de combustion. Puisqu'il n'existe pas de modèle économique universel qui s'appliquerait à tous les producteurs d'électricité, en fonction des circonstances locales, certains pays ou certaines entreprises trouveront avantage à recourir à de très hauts taux de combustion et d'autres non.

Conclusions

Pour atteindre ces très hauts taux de combustion il faudra des progrès technologiques dans des domaines touchant à tous les aspects ou presque du cycle du combustible. Ces progrès sont pour la plupart jugés accessibles si l'incitation est assez forte. Les avancées se feront, comme précédemment, à petits pas. Toutefois, il existe plusieurs obstacles technologiques et en premier lieu, l'enrichissement maximal admissible de 5% imposé aujourd'hui aux usines de fabrication du combustible. Assouplir cette contrainte, n'est pas seulement un défi technologique ; cela nécessitera d'importantes décisions d'investissement de la part des fabricants de combustible. Passer à 6 ou 7% par exemple permettrait d'atteindre le taux de combustion moyen au déchargement le plus élevé qu'il soit probablement possible d'obtenir dans la pratique.

Figure 2: Épaisseur maximale de la corrosion d'un alliage M5 par comparaison avec le Zircaloy-4



Des progrès technologiques seront également nécessaires au niveau de la conception et des matériaux des assemblages combustibles, de la physique du cœur et du comportement thermomécanique du combustible. Il faudra aussi tenir compte des implications sur l'aval du cycle du combustible. Si l'on opte pour un cycle ouvert, la production accrue de chaleur de décroissance et de neutrons par les assemblages combustibles irradiés pourra avoir des conséquences sur les conditions de transport et d'entreposage. Pour un cycle avec retraitement, ces deux effets auront vraisemblablement d'importantes répercussions technologiques. Le rapport contient des recommandations plus précises concernant les orientations technologiques futures.

La partie économique de l'étude révèle une situation complexe où certaines entreprises bénéficieront largement des très hauts taux de combustion, d'autres, au contraire, n'y trouveront pas grand avantage. L'équilibre entre économie et taux de combustion est très délicat car certains effets s'annulent presque les uns les autres. Dans ces circonstances, ce sont les spécificités de chaque exploitant qui lui feront adopter ou non ces taux de combustion élevés. Au stade actuel, il n'est pas possible de proposer des conclusions définitives, et l'on a besoin de savoir comment les fabricants de combustible et autres prestataires de services du cycle du combustible répondront à la demande des producteurs d'électricité qui souhaiteraient passer à des taux de combustion élevés. ■

Note

1. AEN (2006), *Very High Burn-ups in Light Water Reactors*, OCDE/AEN, Paris.