

Examen des critères techniques de sûreté du combustible nucléaire



Examen des critères techniques de sûreté du combustible nucléaire

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996), la Corée (12 décembre 1996) et la République slovaque (14 décembre 2000). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

L'AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays Membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 27 pays Membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

- d'aider ses pays Membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques ; et
- de fournir des évaluations faisant autorité et de dégager des convergences de vues sur des questions importantes qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales des politiques réalisées par l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable.

Les domaines de compétence de l'AEN comprennent la sûreté nucléaire et le régime des autorisations, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, les sciences nucléaires, les aspects économiques et technologiques du cycle du combustible, le droit et la responsabilité nucléaires et l'information du public. La Banque de données de l'AEN procure aux pays participants des services scientifiques concernant les données nucléaires et les programmes de calcul.

Pour ces activités, ainsi que pour d'autres travaux connexes, l'AEN collabore étroitement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne, avec laquelle un Accord de coopération est en vigueur, ainsi qu'avec d'autres organisations internationales opérant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

© OCDE 2001

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France. Tél. (33-1) 44 07 47 70. Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

AVANT-PROPOS

La sûreté des réacteurs nucléaires a pour objectif de s'assurer que l'exploitation des centrales nucléaires de type industriel ne contribue pas notablement aux risques pour la santé des individus et de la société. La sûreté des réacteurs nucléaires concerne donc au premier chef la prévention des dommages qui pourraient résulter de l'exposition du public aux rayonnements liés à l'exploitation des réacteurs nucléaires de type industriel. L'introduction de limites de sûreté vise à éviter des défaillances du combustible en cours d'exploitation normale ou à atténuer les conséquences d'accidents de réacteur au cours desquels des dommages substantiels pourraient être causés au cœur du réacteur.

Dans la plupart des pays, on a défini des limites de débit de dose applicables à d'éventuelles émissions radioactives en dehors du site à la suite d'un accident de réacteur. Des critères de sûreté du combustible, qui ont trait aux dommages causés au combustible, sont ensuite spécifiés de manière à faire en sorte que ces limites ne soient pas dépassées. De nombreux critères visant les dommages au combustible sont utilisés dans les analyses de sûreté. Ces critères peuvent cependant être différents d'un pays à un autre. Certains critères sont utilisés afin de limiter le plus possible la dégradation du gainage en cours d'exploitation normale et certains autres servent à maintenir l'intégrité du gainage au cours de transitoires sans chute de barres, évitant ainsi la libération de produits de fission. D'autres encore servent à limiter les dommages au combustible et à assurer la capacité de refroidissement du cœur au cours des accidents de dimensionnement ou à limiter les risques pour le public imputables à des accidents graves à faible probabilité.

Avec l'apparition de combustibles et de cœurs de conception avancée, l'adoption de modes d'exploitation plus dynamiques et l'application de méthodes de conception et d'analyse plus précises (valeurs réalistes ou statistiques), la question se pose de savoir si les marges de sûreté sont encore appropriées. Le présent rapport fournit une première réponse en passant en revue les critères actuels de sûreté du combustible, en cherchant à déterminer si et de quelle manière ils sont affectés par les éléments de conception « nouvelle » et il identifie les informations (expérimentales ou analytiques) qui pourraient être nécessaires soit pour confirmer la validité des critères de sûreté du combustible nucléaire, soit pour les adapter ou les redéfinir.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	3
RÉSUMÉ DE SYNTHÈSE	7
1. INTRODUCTION.....	9
2. PROGRAMME-CADRE DU GROUPE DE TRAVAIL.....	11
2.1 Critères de sûreté du combustible : contexte historique, antécédents du Groupe de travail	11
2.2 Éléments « nouveaux » liés au dimensionnement et à l'exploitation du combustible	13
2.3 Méthode utilisée par le Groupe de travail pour évaluer les effets potentiels des nouveaux éléments	15
3. EXAMEN DES CRITÈRES DE SÛRETÉ.....	17
3.1 Rapport de puissance critique/rapport d'échauffement critique	17
3.2 Coefficient de réactivité	19
3.3 Marge d'arrêt.....	20
3.4 Enrichissement	22
3.5 Dépôt d'impuretés	22
3.6 Niveau de déformation	23
3.7 Oxydation et hydruration.....	24
3.8 Pression interne des gaz.....	26
3.9 Charges thermomécaniques, interaction mécanique pastille-gainage	27
3.10 Interaction pastille-gaine (IPG)	29
3.11 Fragmentation du combustible (RIA).....	31
3.12 Défaillance du combustible (RIA).....	32
3.13 Fragilisation du gainage/température de pointe du gainage (emballement de la réaction d'oxydation hors APRP)	33
3.14 Fragilisation et/ou oxydation du gainage (APRP).....	34
3.15 Dépressurisation et/ou chargements sismiques	35
3.16 Force de maintien de l'assemblage.....	36
3.17 Activité dans le réfrigérant	38
3.18 Activité dans l'intervalle combustible-gaine	38
3.19 Terme source	39
4. ÉVALUATION DES MÉTHODES D'ANALYSE.....	41
4.1 Programmes de calcul relatifs au combustible en régime permanent.....	41
4.2 Programmes de calcul relatifs aux barreaux combustibles en régime transitoire.....	42
4.3 Programmes de calcul de cinétique des réacteurs	43
4.4 Programme de calcul de statique des réacteurs	44
4.5 Programmes de calcul de thermohydraulique	45

4.6	Programmes de calcul de sous-canaux	45
4.7	Programmes de calcul pour l'analyse structurelle du cœur du réacteur	46
5.	SUJETS SPÉCIAUX.....	47
5.1	Taux de combustion élevé.....	47
5.2	Gestion du cœur.....	49
5.3	Combustible MOX	50
5.4	Cœurs hétérogènes	51
5.5	Descente incomplète des barres de commande	53
5.6	Anomalie du déséquilibre axial de puissance.....	53
6.	PROGRAMMES D'ESSAIS	55
6.1	Programme d'essai de l'ANL.....	55
6.2	Projet de réacteur de Halden.....	56
6.3	Programme de R-D de Belgonucléaire.....	56
6.4	CABRI.....	57
6.5	TAGCIS/TAGGIR/HYDRAZIR.....	58
6.6	CINOG	58
6.7	EDGAR	58
6.8	NSRR.....	58
7.	RECOMMANDATIONS ET RÉSUMÉ.....	59
7.1	Rapport de puissance critique / rapport d'échauffement critique	59
7.2	Coefficients de réactivité.....	59
7.3	Marge d'arrêt.....	59
7.4	Enrichissement	59
7.5	Dépôt d'impuretés	60
7.6	Niveau de déformation	60
7.7	Oxydation et hydruration.....	60
7.8	Pression interne des gaz.....	60
7.9	Charges thermomécaniques, interaction mécanique pastille-gainage	61
7.10	Limites thermomécaniques d'exploitation	61
7.11	Interaction pastille-gaine (IPG)	61
7.12	Accident de réactivité – fragmentation et défaillance du combustible.....	61
7.13	Fragilisation et/ou oxydation du gainage	62
7.14	Dépressurisation et/ou chargements sismiques	63
7.15	Force de maintien de l'assemblage.....	63
7.16	Activité dans le réfrigérant	63
7.17	Activité dans l'intervalle combustible-gaine.....	63
7.18	Terme source	63
7.19	Méthodes d'analyse.....	63
7.20	Programmes relatifs au combustible à fort taux de combustion.....	64
7.21	Conclusion.....	64
8.	REMERCIEMENTS ADRESSÉS AUX MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL ET REMARQUE RELATIVE AU CONTENU DU RAPPORT	67
9.	GLOSSAIRE.....	69
	RÉFÉRENCES	71

RÉSUMÉ DE SYNTHÈSE

Avec l'apparition de modèles avancés de combustible et de cœur, l'adoption de modes d'exploitation plus agressifs et l'application de méthodes de conception et d'analyse plus précises (valeurs réalistes ou statistiques), la question de savoir si les marges de sécurité sont encore appropriées est un sujet de préoccupation. Les critères de sûreté existant actuellement ont été établis pour la plupart, sinon en totalité, au cours des années 1960 et au début des années 1970, et vérifiés à l'aide d'expériences portant sur le combustible qui était disponible à l'époque, le plus souvent des éprouvettes non irradiées. Des vérifications ont bien entendu été effectuées à mesure que des progrès en matière de conception étaient réalisés au cours des années ultérieures, cependant principalement avec pour objectif de pouvoir prouver que ces modèles répondaient correctement aux critères existants, et non pas de définir de nouvelles limites. Le Groupe de travail sur les critères de sûreté du combustible du GTP N°2 du CSIN (OCDE) a donc reçu pour mission de procéder à l'examen technique des critères de sûreté du combustible, en axant son attention sur les nouveaux éléments de « dimensionnement » (nouveautés en matière de modèles de combustible et de cœur, matériaux de gainage, procédés de fabrication, taux de combustion élevé, combustible MOX, etc.) introduits par l'industrie. Il lui incombait aussi de déterminer si des efforts supplémentaires (au plan expérimental et analytique) peuvent être nécessaires pour faire en sorte que la base des critères de sûreté du combustible permette de traiter convenablement les problèmes de sûreté en jeu.

Dans le présent rapport, on a examiné les critères liés au combustible sans chercher à les classer en fonction du type d'événement ou de l'importance du risque. Pour chacun de ces 20 critères, on trouvera une brève description du critère tel qu'il est utilisé dans plusieurs applications, accompagnée de l'indication de sa raison d'être. De nouveaux éléments de dimensionnement, tels que des matériaux de gainage différents, un taux de combustion plus élevé et l'utilisation de combustibles MOX, peuvent avoir des incidences sur les marges liées au combustible et, dans certains cas, sur les critères eux-mêmes. Quelques-uns des effets les plus importants sont mentionnés afin d'indiquer si les critères ont besoin d'être réévalués. L'examen ne peut pas aborder tous les effets possibles, mais devrait être suffisant pour pouvoir cerner les critères qu'il faut traiter. On trouvera à la section 7, un résumé de ces analyses.

Dans le cadre de l'évaluation des critères de sûreté, les membres du Groupe de travail se sont penchés sur diverses questions ayant trait à un ou plusieurs critères, qui revêtent désormais un intérêt particulier. Au nombre de ces questions figurent le taux de combustion élevé, la gestion du cœur, le combustible MOX, les cœurs hétérogènes, la descente incomplète des barres de commande et l'anomalie de déséquilibre axial de puissance.

On s'est également efforcé d'évaluer le niveau actuel des méthodes et des programmes de calcul qui sont utilisés pour vérifier les critères et les marges. Étant donné que les activités de mise au point des programmes de calcul sont largement répandues, le Groupe de travail n'a pas pu recenser toutes ces activités, mais s'est concentré sur celles qui sont nécessaires pour analyser convenablement les effets des nouveaux éléments de dimensionnement.

Le Groupe de travail n'a pas examiné de façon détaillée tous les programmes de recherche en cours et futurs. Cependant, on trouvera quelques exemples de programmes de recherche qui contribuent à l'étude des phénomènes et des mécanismes du comportement du combustible dans des conditions de transitoires et/ou d'accident. Il s'agit notamment des essais en cellules chaudes exécutés au Laboratoire national d'Argonne (ANL), États-Unis, du Projet de réacteur de Halden, des travaux de recherche et de développement de la Société Belgonucléaire en Belgique, du réacteur d'essai Cabri et des programmes connexes en France, et du programme relatif au Réacteur de recherche sur la sûreté nucléaire (NSRR) au Japon.

À la suite de toutes les évaluations susmentionnées, le Groupe de travail estime que le cadre actuel de critères de sûreté du combustible demeure généralement applicable, étant pour large part non concerné par les éléments de dimensionnement « nouveaux » ou modernes ; les niveaux (valeurs) à l'intérieur des divers critères de sûreté peuvent toutefois évoluer en fonction des caractéristiques des particulières des modèles de combustible et de cœur. Certains de ces niveaux ont déjà été ou sont ajustés en permanence ; des ajustements de niveaux de plusieurs autres critères [accident de réactivité (RIA), APRP] semblent également nécessaires, sur la base des données expérimentales et de l'analyse de ces dernières.

En vue de cette (ré)évaluation des critères de sûreté du combustible, il est recommandé de procéder comme suit :

- poursuivre la mise au point de méthodes d'analyse (nominale) réalistes, accompagnée d'une analyse appropriée des incertitudes, dans tous les domaines de l'analyse de sûreté ;
- poursuivre la vérification expérimentale (par le biais d'expériences choisies) en vue de tester par des calculs repères les méthodes réalistes et d'élargir la base de vérification aux critères de sûreté (l'importance des essais pouvant être réduite à mesure que la qualité des méthodes s'améliore) ;
- examiner et réviser le cas échéant les niveaux des critères de sûreté sur la base des méthodes et des données d'essai susmentionnées et quantifier la marge nécessaire par rapport aux limites de sécurité.

Le Groupe de travail considère que les programmes de recherche tels que ceux menés dans le réacteur de Halden, à l'ANL et les programmes de recherche français (Cabri) et japonais (NSRR) sont nécessaires afin d'étayer les progrès de la sûreté car ils contribueront à une connaissance plus détaillée et à la modélisation réaliste des scénarios d'accident affectant les REO.

Avertissement : Le présent rapport contient les résultats et les conclusions d'une évaluation effectuée par un groupe d'experts. Dans plusieurs cas, les résultats détaillés correspondent à une opinion majoritaire et pas nécessairement à l'opinion de chaque membre du groupe. En outre, le contenu du rapport n'exprime pas nécessairement l'opinion des organisations représentées par les divers membres du groupe.

1. INTRODUCTION

Avec l'apparition de modèles avancés de combustible et de cœur, l'adoption de modes d'exploitation plus agressifs et l'application de méthodes de conception et d'analyse plus précises (valeurs réalistes ou statistiques), la question de savoir si les marges de sécurité sont encore appropriées est un sujet de préoccupations. Historiquement, des marges de sécurité du combustible ont été définies par l'application d'un élément supplémentaire de conservatisme aux limites de sûreté, lesquelles ont elles-mêmes été aussi fixées de façon empreinte de conservatisme ; en l'occurrence, le terme « conservatisme » exprime le fait que des valeurs limitatives ont été choisies pour les paramètres du modèle, pour les données de dimensionnement de l'installation et du combustible et pour les valeurs relatives à l'historique d'exploitation du combustible. Malheureusement, comme ces éléments de conservatisme n'ont pas été quantifiés (ou quantifiables), le bien-fondé de l'importance de la marge de sûreté disponible ou de la réduction de cette dernière est difficile à prouver.

Pour l'autorité de sûreté, il importe de connaître les marges et leur base, lorsque la compagnie d'électricité sollicite l'approbation d'un nouveau combustible ou de nouvelles méthodes ; de même, pour la compagnie d'électricité et le fournisseur, il importe de savoir quelles sont les marges disponibles, afin de déterminer la direction dans laquelle de nouveaux progrès peuvent être réalisés pour optimiser le coût du combustible et du cycle du combustible. Naturellement, chacune des parties prenantes devra se prononcer sur l'importance de la marge qu'il convient de maintenir, lorsque des critères ont été établis.

Les critères de sûreté existant actuellement ont été établis pour la plupart, sinon en totalité, au cours des années 60 et au début des années 70, et vérifiés à l'aide d'expériences portant sur le combustible qui était disponible à l'époque, le plus souvent des éprouvettes non irradiées. Des vérifications ont bien entendu été effectuées à mesure que des progrès en matière de conception étaient réalisés au cours des années ultérieures, cependant principalement avec pour objectif de pouvoir prouver que ces modèles répondaient correctement aux critères existants, et non pas de définir de nouvelles limites.

Les critères actuels ont jusqu'à présent rempli leur fonction, en ce sens qu'au cours des décennies d'expérience en matière d'exploitation, il n'a été fait état d'aucun incident imputable à l'inadéquation des critères de sûreté. De nouvelles exigences visant les performances du combustible et des centrales ont toutefois réduit les marges disponibles ; de même avec l'optimisation de l'utilisation du combustible et des performances des centrales, on observe une tendance à l'apparition de conditions pour lesquelles on possède moins d'expérience en matière d'exploitation et moins de données expérimentales. Le Groupe de travail sur les critères de sûreté du combustible du GTP N°2 du CSIN (OCDE) a donc reçu pour mission de procéder à l'examen technique des critères de sûreté du combustible, en axant son attention sur les nouveaux éléments de « dimensionnement » (nouveautés en matière de modèles de combustible et de cœur, matériaux de gainage, procédés de fabrication, taux de combustion élevé, combustible MOX, etc.) introduits par l'industrie. Il lui incombait aussi de déterminer si des efforts supplémentaires (au plan expérimental et analytique) peuvent être nécessaires pour faire en sorte que la base des critères de sûreté du combustible permette de traiter convenablement les problèmes de sûreté en jeu.

2. PROGRAMME-CADRE DU GROUPE DE TRAVAIL

2.1 Critères de sûreté du combustible : contexte historique, antécédents du Groupe de travail

La sûreté des réacteurs a pour objectif de faire en sorte que l'exploitation des centrales nucléaires commerciales ne contribue pas de façon notable aux risques pour la santé de l'individu comme de la population. La sûreté des réacteurs s'intéresse avant tout à la prévention des dommages liés aux rayonnements susceptibles d'être causés au public par suite de l'exploitation de réacteurs nucléaires commerciaux ; des limites de sûreté sont introduites afin d'éviter des défaillances du combustible pendant l'exploitation normale, ou d'atténuer les conséquences des accidents de réacteur au cours desquels des dommages substantiels sont causés au cœur du réacteur.

Dans la plupart des pays, des limites sont fixées au débit de dose dans le cas d'un éventuel rejet de radioactivité hors site consécutif à un tel accident ; des critères de sûreté du combustible qui se rapportent à l'endommagement du combustible sont alors stipulés pour garantir que ces limites ne soient pas dépassées.

Les critères de sûreté du combustible sont le thème central du présent rapport. Les critères de sûreté en vigueur pour les réacteurs à eau ordinaire, qui constituent la grande majorité des centrales nucléaires commerciales existant dans le monde, ont été élaborés vers la fin des années 60 et au début des années 70. Le principe à la base de ce processus d'élaboration était que les conséquences de ces événements hypothétiques, qui peuvent se produire dans les centrales nucléaires, sont inversement proportionnelles à leur probabilité. Dans un souci de simplicité, ces événements ont été classés en deux catégories : les transitoires prévus (autrement dit, les incidents de fonctionnement prévus) et les accidents hypothétiques. En général, les événements, dont la probabilité de survenue était comprise entre ~ 1 et 10^{-2} /an, ont été qualifiés de transitoires prévus, ou simplement de transitoires, alors que tous les autres événements dont la probabilité était inférieure à 10^{-2} /an ont été qualifiés d'accidents (hypothétiques).

Le spectre de fréquence à l'intérieur de ces deux catégories est variable. Parmi les transitoires, il existe des événements plus fréquents (classés dans la plupart des pays comme inhérents à l'exploitation normale, ou événements de catégorie 1), et d'autres moins fréquents (classés dans la plupart des pays comme défauts de fréquence modérée, ou événements de catégorie 2). Parmi les accidents, il y a des événements qui conduisent à la défaillance de quelques barreaux de combustible (grippage de la pompe primaire du réacteur, par exemple, classé dans la plupart des pays comme événement de catégorie 3) de même que des accidents hypothétiques de faible probabilité (appelés accidents de dimensionnement, et classés dans la plupart des pays comme événements de catégorie 4), tels que ceux qui résultent des accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP), ou des accidents de réactivité (RIA), qui les uns et les autres peuvent conduire à des défaillances plus sérieuses du combustible. Ces deux derniers types d'accidents de dimensionnement sont présumés avoir une vraisemblance ou une probabilité de survenue de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} /an.

Ces probabilités ont été prises en compte dans l'élaboration des critères de sûreté du combustible. Pour les transitoires les plus probables, les critères de sûreté prévoient que seul un très petit nombre de barreaux de combustible dans le cœur peut subir une crise d'ébullition. Autrement dit, le rapport d'échauffement critique (REC) pour les REP ou le rapport de puissance critique pour les REB seront déterminés de manière à ce qu'avec une probabilité de 95 %, au niveau de confiance de 95 %, le flux thermique critique ne soit pas dépassé. Pour les accidents moins probables, les critères sont habituellement établis de manière à garantir la possibilité de refroidissement du cœur (par exemple, limites fixées au dépôt d'énergie dans le combustible au cours d'un accident de réactivité ou limites fixées à la température et à l'oxydation totale du gainage à la suite d'un APRP). Des critères applicables aux conditions normales d'exploitation ont également été élaborés pour garantir que les conditions initiales du combustible avant un transitoire ou un accident ne portent pas atteinte aux critères mêmes de sûreté du combustible, ou ne conduisent pas à leur dépassement.

Vers la fin des années 60 et au début des années 70, on a exécuté un certain nombre d'expériences qui ont fourni des informations sur le comportement du combustible et du cœur du réacteur dans le cas des conditions d'accident de dimensionnement les plus graves. Ces informations ont été utilisées pour mettre au point les critères de sûreté du combustible applicables à ces accidents de même que les méthodes analytiques connexes (programmes de calcul). Au cours de la mise au point de ces critères et méthodes, on a estimé que vers 40 MWj/kg, on était en présence de taux de combustion élevés ; des données allant jusqu'à ce taux de combustion ont été incluses dans les bases de données destinées aux critères, programmes de calcul et décisions réglementaires, et l'on pensait qu'il était possible de procéder à une certaine extrapolation du taux de combustion. Cependant, vers le milieu des années 80, des modifications de la microstructure des pastilles ont été observées à partir d'une variété de données obtenues à des taux de combustion élevés, parallèlement à des accroissements du taux de corrosion du gainage. Il est ainsi devenu manifeste que quelque chose de nouveau se produisait à un taux de combustion élevé et/ou dans de nouveaux environnements d'exploitation, et qu'il n'était pas correct de continuer d'extrapoler des données relatives aux transitoires tirées des bases de données existantes correspondant à de faible taux de combustion et/ou à des environnements d'exploitation classiques.

Dans l'intervalle, les autorités chargées de la réglementation dans un certain nombre de pays ont permis d'exploiter des réacteurs à des irradiations supérieures à celles utilisées lors de l'élaboration des critères de sûreté du combustible mentionnés plus haut ; aux États-Unis, par exemple, la Commission de la réglementation nucléaire [*Nuclear Regulatory Commission – NRC*] a autorisé un taux de combustion du combustible dans les réacteurs nucléaires commerciaux atteignant 62 MWj/kg (irradiation moyenne du barreau le plus irradié). En Europe, des programmes de vérification à taux de combustion élevé sont en cours, avec des barreaux de combustible dans les assemblages d'essai principaux atteignant des irradiations allant jusqu'à 100 MWj/kg.

Par suite de la tendance relevée dans le monde entier à accroître le taux de combustion du combustible bien au-delà du niveau de 40 MWj/kg et des observations visant les modifications de la microstructure des pastilles et des taux accrus de corrosion du gainage à des combustions massiques plus élevées, on a entrepris un certain nombre de programmes, de caractère tant expérimental qu'analytique, en vue d'évaluer les effets de cette combustion massique plus élevée sur le comportement du combustible, spécialement dans des conditions d'accident de réactivité ou d'APRP.

Le programme de Halden, par exemple, a étendu la portée des recherches sur les propriétés du combustible à des taux de combustion de l'ordre de 50 à 80 MWj/kg [1]. L'intérêt a été porté à son comble à la suite de deux essais ayant trait au comportement du combustible au cours d'accidents hypothétiques, qui ont été exécutés respectivement dans l'installation CABRI par les Français et dans l'installation du Réacteur de recherche sur la sûreté nucléaire par les Japonais. Au cours de ces deux

essais (dénommés REP Na-1 et HBO-1) exécutés à l'aide de combustible hautement irradié, il y a eu défaillance de certains et une dispersion du combustible d'une certaine importance a été observée à des valeurs de l'enthalpie sensiblement inférieures aux limites de la valeur maximale de l'enthalpie du combustible qui avaient été établies antérieurement par les diverses autorités réglementaires. Cela a conduit à élargir les efforts dans un certain nombre de pays en vue d'obtenir une connaissance plus complète du comportement du combustible irradié dans des conditions d'accidents hypothétiques.

Dans son rapport de 1996, intitulé « Sûreté nucléaire : Recherches dans les pays de l'OCDE », le Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) a recommandé que les limites d'endommagement du combustible à des taux de combustion élevés constituent un domaine de recherche prioritaire. En particulier, il est indiqué dans ce rapport qu'« il faudrait prioritairement s'attacher à établir des limites qui recouvrent toute la gamme, tant des taux de combustion que des transitoires possibles (apport de réactivité, APRP, etc.) Ces limites devraient permettre de garantir l'intégrité du combustible à partir de paramètres appropriés (par exemple, enthalpie, degré d'oxydation du gainage). » Enfin, le CSIN et le CANR ont décidé, lors de leur session de décembre 1996, d'entreprendre des travaux en vue de procéder à un examen beaucoup plus large (que les seules questions liées aux taux de combustion élevés) du comportement du combustible et des prescriptions requises pour garantir des marges de sûreté appropriées dans le cas des modèles modernes de combustibles et de cœur. Cette mission a été assignée au GTP N°2 et un Groupe de travail a été constitué en vue d'exécuter ces travaux.

An conséquence ce Groupe de travail (**Groupe de travail sur les critères de sûreté du combustible**) a été chargé d'examiner les critères de sûreté en vigueur, de déterminer si et de quelle manière ils sont affectés par les « nouveaux » éléments de dimensionnement et de déterminer quelles informations (expérimentales ou analytiques) pourraient être nécessaires pour soit en confirmer le caractère adéquat des critères de sûreté du combustible, soit pour les corriger ou les redéfinir. Le Groupe de travail s'est penché sur tous les aspects (tant du dimensionnement que de l'exploitation) susceptibles d'avoir une incidence sur les critères de sûreté du combustible [la section 2.2 du présent rapport répertorie et examine ces aspects, ou « nouveaux » éléments de dimensionnement]. En outre, le Groupe de travail a axé son attention sur les questions liées à la sûreté plutôt que sur les questions de « performances générales du combustible ».

Il se peut que les marges soient fixées de façon différente dans les divers pays, et elles dépendront ainsi de l'interprétation technique et réglementaire des critères de sûreté.

2.2 Éléments « nouveaux » liés au dimensionnement et à l'exploitation du combustible

Les critères actuels de sûreté du combustible élaborés vers la fin des années 60 et au début des années 70, étaient fondés sur des essais et des analyses connexes exécutés à l'aide des modèles de combustible et de cœur ainsi que des matériaux de gainage (Zry-2 pour les REB et Zry-4 pour les REP, par exemple), utilisés à l'époque, de combustible en UO₂ et de niveaux de combustion massique ne dépassant pas 40 MWj/kg. Afin d'optimiser le coût du cycle du combustible, l'industrie nucléaire a commencé à travailler vers le milieu des années 80 sur les nouveaux modèles de combustible et de cœur, dans le but d'accroître la combustion massique du combustible, par exemple, afin de prolonger la durée du cycle ou d'améliorer le niveau de puissance. Cela a conduit à nouveau à un certain nombre de modifications techniques fondamentales, par exemple à de nouveaux matériaux de gainage ; l'utilisation du plutonium fissile dans du combustible à mélange d'oxydes (MOX) a aussi été envisagée par certaines compagnies d'électricité.

La conception du combustible devrait être conforme aux critères généraux de conception [2] qui régissent le dimensionnement et l'exploitation des centrales nucléaires. Ainsi, les critères de sûreté du combustible en vigueur sont examinés en regard des éléments de dimensionnement applicables à ce jour. Le tableau 1 répertorie les critères de sûreté du combustible en regard des nouveaux éléments de dimensionnement qui sont susceptibles de les modifier ; une liste de tous les nouveaux éléments envisagés est présentée dans ce tableau, alors que certains éléments principaux sont mis en exergue ci-après.

D'une façon générale, le **taux de combustion élevé du combustible** revêt un grand intérêt pour les exploitants nucléaires en raison de leur besoin de réduire le coût du cycle du combustible, amplifié présentement par l'introduction de la déréglementation dans le secteur de l'électricité. Ainsi, la capacité d'atteindre un taux de combustion élevé se trouve au centre même des nouveaux éléments de dimensionnement et a déclenché des activités dans le monde entier. Cette question a déjà été évoquée plus haut et sera traitée en vue d'évaluer ci-après les divers critères de sûreté ; en outre, on trouvera à la section 5.1 du présent rapport une récapitulation distincte de la question du taux de combustion élevé.

Afin d'atteindre un taux de combustion élevé avec des puissances thermiques linéiques supérieures, les **matériaux de gainage** des barreaux de combustible des REO utilisés au cours des 30 dernières années (fondés sur le Zry-2 pour les REB et le ZRy-4 pour les REP) ont subi d'importantes modifications au cours des 10 à 15 dernières années. Afin de réduire le taux de corrosion et l'absorption d'hydrogène dans le métal, la concentration de Sn a été réduite (alliages à faible teneur en Sn tels que le gainage ELS de Siemens) et les alliages contenant du Nb (Zirlo de Westinghouse, par exemple). En dehors des tubes de gainage intégraux, plusieurs concepts de peau d'étanchéité interne et externe ont été introduits afin de faire face à divers problèmes de performances (peau d'étanchéité interne dans le cas des REB pour la résistance à l'interaction pastille-gaine, peaux d'étanchéité externes dans le cas des REP pour la réduction de la corrosion à puissance élevée).

Afin d'atteindre des irradiations élevées au déchargement et de gagner sur les marges thermiques, on a introduit des **modèles plus avancés de combustible**. La configuration des aiguilles de combustible a changé, passant d'aiguilles grossières à gros diamètres du combustible et du gainage, à des aiguilles plus minces ayant de plus petits diamètres du combustible et du gainage, ce qui permet de réduire le flux thermique par unité de surface du gainage. Dans le cas des REP, le nombre de barreaux combustibles par élément a été accru, passant de 14x14/15x15/16x16 à 16x16/17x17/18x18 aiguilles. Le nombre d'aiguilles de combustible des REB s'est accru suivant la même tendance en passant d'une configuration de 8x8 à 9x9, voire à 10x10. Parallèlement à ces changements, l'épaisseur du gainage a également été réduite et est aujourd'hui de l'ordre de 0,6 à 0,75 mm, chiffre qui peut inclure une peau d'étanchéité (barrière) interne d'environ 70µm.

Les barreaux de **combustible MOX** ne diffèrent des barreaux de combustible en UO₂ que par la matière constituant la pastille de combustible : l'UO₂ est remplacé par le mélange d'oxydes PuO₂-UO₂ dans lequel la teneur en PuO₂ peut varier de 2 à 10 % en poids selon la position du barreau à l'intérieur de l'assemble combustible et les critères de dimensionnement. Dans les cas où du combustible MOX a été utilisé, la configuration, les dimensions et le matériau de gainage sont identiques qu'il s'agisse de barreaux d'UO₂ ou de MOX. Dans la plupart des pays, le plutonium provient du recyclage de combustible « irradié » ; en outre, il existe une possibilité d'incinérer du plutonium de qualité armement dans des réacteurs commerciaux tant aux États-Unis qu'en Russie. Par suite de l'introduction de combustible nouveau de type avancé et/ou de combustible MOX, on se trouve en présence de **cœurs hétérogènes**, autrement dit d'assemblages de combustible de modèles différents qui sont présents en même temps dans un cœur. Ce problème sera traité séparément.

Avec le régime thermique sévère qui se rencontre dans le cas de certaines des stratégies actuelles de gestion du combustible, et en vue de réduire les niveaux d'irradiation dans les composants de l'installation, on a eu recours ces dernières années à des stratégies faisant appel à une **chimie de l'eau modifiée** avec une plus forte concentration de lithium, entraînant des valeurs plus élevées du pH, ou avec l'injection de Zn ou de Fe dans le réfrigérant primaire afin de réduire les débits de dose ou d'améliorer la protection contre la corrosion. Cette chimie, par exemple, s'est avérée appropriée pour maîtriser le dépôt d'impuretés. Malgré cela, comme les centrales qui passent à des cycles d'exploitation prolongés exigent l'introduction de quantités supplémentaires de bore soluble en début de cycle, afin de maintenir le pH au niveau requis (autour de 7,2), avec cette concentration de bore, le combustible doit être exploité avec une teneur élevée en lithium (supérieure à 2,2 ppm) pendant un certain temps, ce qui pourrait accroître le taux de corrosion.

De l'hydrogène peut être ajouté au réfrigérant afin de réduire la quantité d'oxygène présente, qui se forme par radiolyse, ce qui diminue en conséquence le taux d'oxydation du zircaloy. Si l'on augmente trop la concentration d'hydrogène, l'hydruration du gainage et la fragilisation qui en résulte pourraient se trouver majorées. Dans certains cas, de l'hydrogène est ajouté pour réduire les débits de dose au niveau des canalisations de recirculation ; des métaux nobles peuvent être injectés en même temps, afin de limiter la quantité d'hydrogène ajouté.

2.3 Méthode utilisée par le Groupe de travail pour évaluer les effets potentiels des nouveaux éléments

De nombreux critères liés à l'endommagement du combustible sont utilisés dans les analyses de sûreté : ces critères peuvent être différents d'un pays à un autre. Certains sont utilisés pour limiter le plus possible la dégradation du gainage en cours d'exploitation normale. D'autres sont utilisés pour maintenir l'intégrité du gainage au cours des transitoires prévus, évitant ainsi la libération de produits de fission. D'autres encore servent à limiter l'endommagement du combustible et à assurer la possibilité de refroidissement du cœur au cours d'accidents de dimensionnement, ou à limiter le risque pour le public imputable aux accidents graves à faible probabilité.

Il peut être difficile de classer ces critères en fonction du type d'événement. Par exemple, des limites sont parfois assignées à l'oxydation du gainage en cours d'exploitation normale afin de garantir de bons résultats d'exploitation, alors que, dans d'autres cas, de telles limites d'oxydation peuvent être liées à la résistance mécanique du gainage contribuant au comportement en cas d'APRP.

Au tableau 1 les critères liés au combustible sont par conséquent énumérés sans chercher à les classer en fonction du type d'événement ou de l'importance du risque. La question de l'importance relative de ces critères sera laissée à l'appréciation des organismes de réglementation et autres qui utilisent ces informations. Pour chacun des critères figurant au tableau 1, on trouvera une brève description du critère tel qu'il est utilisé dans plusieurs applications, parallèlement à l'exposé de sa raison d'être.

Les « éléments » nouveaux, tels que des matériaux de gainage différents, un taux de combustion élevé et l'emploi de combustible MOX, peuvent influencer sur les marges liées au combustible et, dans certains cas, sur les critères eux-mêmes. Dans les paragraphes suivants, on a mentionné certains des effets les plus importants afin d'indiquer si les critères ont besoin d'être réévalués. L'examen suivant ne peut pas couvrir tous les effets possibles, mais devrait être suffisant pour déterminer les critères qui doivent être traités.

Tableau 1. Critères de sûreté du combustible existant actuellement

Critères liés à la sûreté	Catégorie*	« Nouveaux » éléments influant sur les critères	Liste des « nouveaux » éléments de dimensionnement
(a) rapport de puissance critique/ rapport d'échauffement critique	A, B, C	1, 2, 5, 6, 7, 9	1. Nouveaux modèles de combustible
(b) coefficient de réactivité	B, C	2, 5, 6, 7, 8, 9	2. Nouveaux modèles de cœur
(c) marge d'arrêt	A, B, C	1, 2, 5, 6, 7, 8, 11	3. Nouveaux matériaux de gainage
(d) enrichissement	A, B, C	1, 2, 5	4. Nouveaux procédés de fabrication
(e) dépôt d'impuretés	A	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10	5. Cycle du combustible allongé
(f) niveau de déformation	A, B	1, 3, 4, 7, 8	6. Puissance surdimensionnée
(g) oxydation	A, B, C	3, 4, 7, 8, 10	7. Taux de combustion élevé
(h) concentration d'hydrures	A, B, C	3, 4, 7, 8, 10	8. Combustible MOX
(i) pression interne des gaz	A, B, C	1, 5, 6, 7, 8	9. Cœur hétérogène
(j) charges thermomécaniques	A, B	1, 3, 4, 7	10. Modifications de la chimie de l'eau
(k) interaction pastille-gaine	A, B, C	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11	11. Pratiques actuelles / nouvelles en matière d'exploitation
(l) fragmentation du combustible (accident de réactivité)	C	7, 8	
(m) défaillance du combustible (accident de réactivité)	C	1, 3, 4, 7, 8	
(n) fragilisation du gainage / température de pointe du gainage (emballage de l'oxydation hors APRP)	C	3, 4, 7, 8	
(o) fragilisation / oxydation du gainage	C	3, 4, 7, 8	
(p) dépressurisation / chargements sismiques	C	3, 7	
(q) force de maintien de l'assemblage	A, B, C	1, 11	
(r) activité dans le réfrigérant	A, B, C	5, 6, 7, 8	
(s) activité dans l'intervalle combustible-gaine	C	5, 6, 7, 8	
(t) terme source	C	5, 6, 7, 8	

* A – exploitation normale, B – transitoires prévus, C – accidents hypothétiques

3. EXAMEN DES CRITÈRES DE SÛRETÉ

On trouvera dans cette section, un examen des répercussions possibles des nouveaux éléments de dimensionnement sur tous les critères de sûreté du combustible actuellement approuvés. La nécessité de procéder à une réévaluation sera déterminée parallèlement à chaque critère. Tout au long de cet examen, la base des critères de sûreté est présumée non modifiée par rapport à la base primitive [2].

Diverses organisations de par le monde mènent des travaux de recherche sur les effets des nouveaux éléments de dimensionnement tels que des matériaux de gainage différents, des taux de combustion élevés, et l'utilisation de plutonium fissile dans des combustibles MOX. Le Groupe de travail s'est employé, par l'entremise de ses membres et de ses contacts avec l'industrie, à recenser les travaux de recherche liés aux divers critères de sûreté du combustible et à déterminer la nécessité éventuelle d'entreprendre des travaux supplémentaires dans ce domaine.

3.1 Rapport de puissance critique/rapport d'échauffement critique

Les critères de sûreté les plus largement utilisés pour l'intégrité du gainage sont liés au flux thermique critique. Il s'agit du rapport de puissance critique pour les REB, et du rapport d'échauffement critique (REC) pour les REP. Dans un REP, le flux thermique critique se produit lorsque la densité des bulles produites par l'ébullition nucléée dans la couche limite du barreau chaud est si importante que les bulles voisines fusionnent et forment un film de vapeur à la surface du barreau. Le transfert de chaleur à travers ce film est relativement médiocre de sorte que si le flux thermique est encore accru (ou si le débit de réfrigérant est réduit), la température du gainage augmenterait rapidement et notablement. Une fusion ou une oxydation rapide du gainage pourrait alors se produire et entraîner la défaillance de ce dernier. De même, dans un REB le flux thermique critique au démarrage de l'ébullition transitoire ne doit pas être dépassé.

Les limites assignées au rapport de puissance critique et au rapport d'échauffement critique garantissent que seule une très faible proportion du gainage du combustible (0,1 % de la totalité des barreaux combustibles dans la plupart des pays ; en Allemagne, la caléfaction ne doit pas se produire dans le cas des barreaux à plus forte puissance unitaire) devrait statistiquement (niveau 95/95) subir une défaillance au cours des incidents de fonctionnement prévus, et indiquent à quel moment la défaillance se produit au cours des accidents hypothétiques de manière à permettre d'estimer les doses hors site. Afin de maintenir également une marge adéquate de performance du combustible pendant le fonctionnement normal en régime permanent, un additionneur est habituellement appliqué à la limite de sûreté relative au rapport de puissance critique et/ou à la caléfaction, qui correspond à l'accroissement du flux thermique au cours de l'incident de fonctionnement prévu le plus pénalisant ; cela constitue la limite d'exploitation qui est continuellement vérifiée pendant l'exploitation de la centrale.

La limite de sûreté relative au rapport de puissance critique et/ou au rapport d'échauffement critique est tirée d'une analyse statistique, dans laquelle les caractéristiques de flux thermique propres

à l'assemblage combustible sont prises en compte dans le cas d'un chargement spécifique du cœur. Des hypothèses limitatives génériques ont historiquement été formulées concernant le chargement du cœur (en utilisant ce qu'il est convenu d'appeler un « cœur de référence ») ; de cette manière, la limite de sûreté ne dépend que des caractéristiques des assemblages combustibles et n'est réévaluée que si le type de combustible change. En présence de modèles avancés de combustible et de cœur, de situations de cœur hétérogène et en vue de réduire le conservatisme superflu, la limite de sûreté est aujourd'hui fréquemment réévaluée sur la base du chargement du cœur propre au cycle considéré et devient ainsi une limite propre à ce cycle. Ainsi, tous les détails nécessaires relatifs au modèle effectif de combustible et cœur sont pris en compte.

La méthode statistique utilisée pour établir la limite de sûreté est habituellement fondée sur une technique de Monte Carlo, qui calcule le flux thermique critique pour chaque assemblage présent dans le cœur, en de multiples points d'irradiation au cours du cycle, tout en introduisant des variations aléatoires dans les variables d'entrée (données de fabrication, données mesurées dans l'installation, corrélation du flux thermique critique) sur la base des incertitudes connues dont elles sont entachées ; de même, les incertitudes entachant le modèle sont traitées statistiquement.

La corrélation du flux thermique critique établit un lien entre ce dernier et les paramètres d'exploitation ; cette corrélation est un ajustement mathématique aux données tirées d'essais en vraie grandeur (Note : les essais relatifs aux REP utilisent d'ordinaire un réseau de barreaux plus petit) que le fournisseur de combustible exécute spécifiquement pour chaque modèle d'assemblage. Ainsi, la corrélation du flux thermique critique est propre au type d'assemblage combustible. Les paramètres de corrélation comprennent la pression, le débit, le sous-refroidissement, le pic de puissance à l'intérieur de l'assemblage combustible et le profil de distribution axiale de la puissance ; des essais sont exécutés en faisant varier séparément chacun de ces paramètres. Afin de réduire l'importance de ces essais (laborieux et coûteux) des modèles hydrauliques (de sous-canaux) tels que VIPRE ou COBRA, sont utilisés pour établir une « fonction de réponse » aux variations dans certaines variables ; une fois ces modèles convenablement validés par comparaison avec les résultats d'essais, il est alors possible de réduire le nombre d'essais complémentaires à exécuter. La même corrélation du flux thermique critique est utilisée pour la surveillance du cœur, pour déduire le flux thermique critique applicable au point d'exploitation réel (bilan thermique, etc.).

En conséquence, les limites de sûreté afférentes au rapport de puissance critique et/ou au rapport d'échauffement critique peuvent être considérées comme reflétant correctement les modèles modernes de combustible et de cœur ; il s'agit de l'un des domaines peu nombreux où des méthodes statistiques sont appliquées de façon cohérente avec un traitement rigoureux des incertitudes. Les fournisseurs de combustible ont mis au point des corrélations du flux thermique critique (W-3, GEXL, par exemple) qui sont appliquées avec succès dans le monde entier ; à ce jour, aucune défaillance du combustible n'a été imputable à des insuffisances dans l'établissement de ces limites de sûreté¹. Bien qu'il ne soit pas nécessaire, semble-t-il, de modifier les critères de sûreté ni les méthodes utilisées pour les établir, certains essais paraissent être requis. Il s'agit notamment d'essais en vraie grandeur en vue d'établir la modélisation thermohydraulique appropriée des assemblages de conception nouvelle. Les méthodes statistiques doivent aussi intégrer des progrès méthodologiques tels que la capacité de calcul détaillé de la puissance des aiguilles des méthodes modernes de calcul tridimensionnel en régime permanent.

1. Les défaillances du combustible par assèchement survenues en 1988 dans la tranche 2 de la centrale d'Oskarshamn (Suède), étaient imputables à une courbure excessive des canaux et à des données d'entrée incorrectes dans le modèle de surveillance du cœur. Au total, 4 barreaux ont fonctionné avec un dépassement de 20 à 30 % de la limite de sûreté relative au rapport de puissance critique pendant plusieurs mois avant de subir une défaillance.

En outre, il convient de se pencher sur un sujet de préoccupation qui a trait au taux de combustion élevé. Les caractéristiques de transfert thermique des barreaux combustibles sont susceptibles d'être affectées par les épaisses couches d'oxyde (qui sont parfois sujet à un écaillage) qui peuvent apparaître sur le gainage à taux de combustion élevé, ou par d'épaisses couches d'impuretés. Les corrélations du rapport de puissance critique et du rapport d'échauffement critique sont, en général, établies à partir de données relatives à des tubes de gainage neufs non oxydés ou légèrement oxydés et peuvent ne pas être exactes pour un gainage à taux de combustion élevé. Des variations dans les matériaux et la fabrication peuvent entraîner de petites modifications dans les caractéristiques de transfert thermique, mais l'effet de l'oxydation sur l'état de surface pourrait revêtir de l'importance.

3.2 Coefficient de réactivité

La notion des coefficients de réactivité a été introduite afin de simplifier le traitement analytique, par exemple en quantifiant les contre-réactions de réactivité dans l'équation cinétique ponctuelle et accroître la compréhension des variations de réactivité imputables à divers paramètres physiques. Les coefficients de réactivité constituent ainsi un sujet d'analyse ; en ce qui concerne les critères de sûreté des REO, il existe une exigence générale que la somme de tous les coefficients de réactivité soit négative lorsque le réacteur est critique, afin de disposer d'une contre-réaction de réactivité négative (ou que les effets d'un éventuel coefficient positif de réactivité soient sans conséquences).

Les coefficients de réactivité dépendent des quatre variables d'état suivantes du cœur du réacteur, qui sont dans une certaine mesure indépendantes les unes des autres :

- la température T_f du combustible ;
- la température T_m du modérateur (réfrigérant) ;
- la fraction volumique (de vide) de la vapeur dans le réfrigérant (μ) ;
- la pression P_s du système.

La température du combustible ou coefficient Doppler dp/dT_f , où p est la réactivité, réagit rapidement à l'enthalpie déposée dans le combustible, alors que les autres coefficients sont retardés. La constante de temps du combustible, qui dépend principalement de la chaleur spécifique, de la conductivité et du diamètre du combustible, influe sur la temporisation des modifications de température et de fraction de vide du modérateur. Le coefficient de température du combustible dépend par conséquent du taux de combustion du combustible. Plus ce taux est élevé, plus le spectre est dur, de sorte qu'en général la modification du coefficient de température du combustible en fonction de la combustion massique est faible dans les réacteurs à eau ordinaire.

L'important coefficient de vide négatif dans les REB, confère à ces réacteurs des caractéristiques inhérentes de stabilisation sans intervention des opérateurs. Dans les modèles modernes de combustible, de l'eau est ajoutée dans la partie centrale de la grappe par des canaux d'eau spéciaux de configurations variées à l'intérieur de l'assemblage combustible, qui n'est pas autant échauffée que l'eau de refroidissement dans le reste de l'assemblage et a une fraction de vide nettement inférieure conduisant ainsi à un coefficient de vide moins négatif.

Dans les REP dans des conditions normales d'exploitation, il n'existe pas de vide dans le cœur. Toutefois, dans le cas d'événements anormaux tels que la perte de réfrigérant primaire, ou la perte de pression, le réfrigérant peut commencer à bouillir et du vide apparaît et réduit l'absorption de neutrons dans le bore, ce qui entraîne une contribution positive au coefficient de vide. À la

température d'exploitation, lorsque la concentration de bore est faible, l'effet sera peu important et le coefficient de vide demeure négatif. À basse température, lorsque la concentration de bore est élevée, l'effet est important et le coefficient de vide peut devenir positif.

Une augmentation de la température T_m du modérateur/réfrigérant cause principalement deux effets :

- la masse volumique de l'eau diminue et l'effet est semblable à celui de l'augmentation du vide ;
- le spectre des neutrons thermiques se durcit et donc les sections efficaces neutroniques se modifient.

Dans un REP à réfrigérant fortement boré, dp/dT_m est négatif dans les conditions normales d'exploitation mais est légèrement positif à des températures plus basses. En raison du taux de combustion élevé du combustible, le coefficient de température du modérateur devient également plus négatif en fin de cycle. Cela a une incidence sur les accidents de refroidissements tels que l'accident de rupture de tuyauterie vapeur, car une réactivité plus positive est introduite à partir du refroidissement et le réacteur revient à un niveau de puissance plus élevé qu'auparavant.

La pression du système dans un REB est liée à la température de saturation du modérateur. La dépressurisation du système causera une vaporisation instantanée, autrement dit la production de bulles de vapeur dans l'eau. Un tel événement introduit une variation de réactivité négative dans un REB et ne conduit à aucun problème de sûreté s'agissant de la réactivité.

L'effet d'un à-coup de pression positif ne présente de l'intérêt que dans un REB, où il existe un taux de vide important. Une augmentation soudaine de la pression du système, causée par exemple par un déclenchement de la turbine, entraînera une rupture partielle du vide conduisant à une variation de réactivité positive.

Un taux de combustion élevé implique habituellement le chargement de grappes de combustible neuf plus réactif. Cette réactivité supplémentaire est compensée par la conception du combustible (adjonction de poison consommable) et du cœur, sans perdre de vue la nécessité de satisfaire le critère de sûreté fondamental (coefficient de réactivité total négatif).

En résumé, bien que les coefficients de réactivité puissent être affectés, les effets des nouveaux éléments de dimensionnement ne sont pas considérés comme ayant une incidence sur les critères mêmes de sûreté correspondants.

3.3 Marge d'arrêt

Pour amener un réacteur à l'état sous-critique, il faut disposer soit de barres de commande ayant une antiréactivité suffisante soit d'une concentration de bore suffisante dans le réfrigérant primaire.

Dans le cas des barres de commande, cette exigence liée à la sous-criticité devient ce qu'il est convenu d'appeler la marge d'arrêt (ou marge d'antiréactivité). Cette marge est définie comme étant la marge à la criticité ($k_{eff} = 1$) lorsque toutes les barres de commande sont insérées et la barre de commande la plus forte est retirée. La marge d'arrêt devrait être suffisante pour atteindre la puissance nulle à chaud ; en ce qui concerne les REB, la marge d'arrêt est analysée à puissance nulle à froid dans le cas d'un cœur exempt de xénon, afin d'en déterminer le caractère empreint de conservatisme. La

limite fixée dans les spécifications techniques pour la marge d'arrêt, habituellement de l'ordre de 0,3-0,5 % $\Delta K/K$, est surtout établie à partir de l'ensemble des incertitudes admises dans la détermination de k_{eff} et des tolérances de fabrication des barres de commande. Cette limite est habituellement vérifiée au moins pendant le démarrage du cycle (au rechargement) ; les limites nominales applicables à la marge d'arrêt sont habituellement égales ou supérieures à 1 % $\Delta K/K$, afin de se prémunir contre les dérives systématiques imprévues dans la prévision de la valeur de k_{eff} .

En ce qui concerne les REP, une augmentation de la concentration en bore est requise pour réaliser la mise à l'arrêt froid ; cette opération est assurée par les circuits de commande par le bore et/ou de contrôle volumétrique disponibles. D'une façon générale, pour les REP et les REB, la marge d'arrêt relative au bore est la marge à la criticité ($k_{\text{eff}} = 1$) applicable dans le cas où le système d'injection de bore de secours serait activé. La concentration (élevée) en bore devrait être suffisante pour assurer la mise à l'arrêt du réacteur sans déplacement des barres de commande ; à des fins de conservatisme, le xénon présent dans le cœur n'est pas pris en compte. Les limites applicables à la marge d'arrêt relative au bore en cas d'urgence sont établies de la même façon que les limites applicables à la marge d'arrêt relative aux barres de commande mentionnées plus haut, autrement dit elles sont fondées sur les incertitudes entachant les calculs et les incertitudes systémiques. Les valeurs visant la marge d'arrêt relative au bore en cas d'urgence sont de l'ordre de 1 à 4 % $\Delta K/K$, selon que l'analyse est effectuée en utilisant pour le réacteur des conditions génériques et/ou à froid ou qu'elle correspond de façon plus réaliste à des installations et/ou cycles spécifiques. Normalement, la marge d'arrêt relative au bore en cas d'urgence n'est pas explicitement incluse dans les spécifications techniques de la centrale, mais fait plutôt l'objet d'une vérification analytique dans le cadre du processus d'analyse de sûreté et d'autorisation du rechargement.

On a souvent observé pour des cœurs de conception de hautement optimisée une diminution de la marge aux critères applicables à la marge d'arrêt (utilisation de niveaux plus élevés d'enrichissement, souvent associée à des quantités plus importantes de poison consommable). Cependant, des modèles modernes de combustible sont aussi optimisés afin d'obtenir de meilleures performances en matière de marge d'arrêt et peuvent contrebalancer ces effets. Ces stratégies de conception du combustible et du cœur sont suscitées ou amplifiées par des stratégies d'exploitation visant à réaliser des économies sur le coût du cycle du combustible, lesquelles comportent des épaissements élevés du combustible au déchargement, des cycles allongés du combustible et/ou des augmentations de la puissance thermique. Dans le cas du combustible MOX, des valeurs de réactivité des barres de commande et d'efficacité du bore inférieures ont aussi réduit les performances en matière de marge d'arrêt.

Ces marges réduites ont, dans certains cas, induit des modifications dans les centrales telles que :

- l'utilisation de nouvelles barres de commande ayant une valeur de réactivité plus élevée (matière absorbante plus abondante et/ou différente) ;
- un plus grand nombre de barres de commande en place (si la conception de la centrale le permet) ;
- une augmentation de la capacité du circuit de bore (si possible) ;
- l'utilisation de bore enrichi.

afin de compenser la marge perdue. En définitive, le combustible et le cœur doivent être conçus de manière à ce que les critères de sûreté soient respectés ; ces critères n'ont pas été remis en question jusqu'à présent.

On estime que les critères en vigueur concernant la marge d'arrêt ne sont pas affectés par les nouveaux éléments de dimensionnement. Cependant, si l'on utilise une modélisation réaliste ou de type meilleure estimation pour établir ou analyser ces critères, de tels modèles devraient être soigneusement vérifiés ; en particulier, l'incertitude liée à la modélisation devrait être quantifiée afin d'évaluer la marge de sécurité. Pour l'évaluation du caractère approprié de la modélisation et la vérification requise, voir la section 4.

3.4 Enrichissement

Des limites d'enrichissement se situant aux alentours de 5 % en poids de ^{235}U sont utilisées en liaison avec les considérations de criticité pour la fabrication, la manutention et le transport. Pour certaines applications à taux de combustion élevé, on peut avoir besoin d'enrichissements plus importants. A ce jour, la validation des programmes de calcul de sûreté-criticité et des bibliothèques de sections efficaces connexes relatives au combustible des REO, a été axée sur des enrichissements inférieurs à 5 %. Ni les calculs repères relatifs aux performances des programmes de calcul, ni les bases permettant d'extrapoler ces performances dans la fourchette d'enrichissement comprise entre 5 et 10 % n'ont été bien établis. Le passage dans cette fourchette exigera de la circonspection, car la physique de la criticité commence à changer à mesure que l'enrichissement se rapproche de 6 % et plus, valeur pour laquelle des assemblages modérés individuellement peuvent devenir critiques et la criticité de systèmes faiblement modérés ou sous-modérés devient possible. Des enrichissements supérieurs à 5 % exigeront de revoir la conception de certains équipements de fabrication et de manutention du combustible et de certains colis de transport du combustible. La possibilité d'un retour à l'état critique au cours d'accidents, en particulier de séquence de fusion du cœur lors d'accidents graves, doit également être abordée, car cela pourrait modifier le déroulement de tels accidents.

3.5 Dépôt d'impuretés

Le dépôt d'impuretés sur le combustible est habituellement pris en compte à des fins de conception du combustible. La quantité d'impuretés déposée, déterminée parfois en fonction du taux de combustion, mais au moins à la fin de la durée de vie du combustible, est une valeur admise en hypothèse de façon empreinte de conservatisme, qui est vérifiée par comparaison avec des données résultant de mesures (raclures d'impuretés, par exemple). Divers niveaux d'impuretés sont utilisés par les fournisseurs, selon les modèles de conception et/ou les types de combustibles eux-mêmes. On n'a pas défini de limites (de sûreté) précises visant le dépôt d'impuretés, bien que la quantité d'impuretés déposées et leur composition puissent revêtir de l'importance pour les performances du gainage en matière de corrosion (par exemple, corrosion localisée provoquée par le dépôt d'impuretés).

Les nouveaux éléments de dimensionnement, tels que les matériaux de gainage et leurs procédés de fabrication, peuvent tout à fait influencer sur l'accumulation d'impuretés et ce faisant sur les performances en matière de corrosion de la gaine du combustible. La composition des impuretés pourrait influencer la corrosion localement, soit en faisant office d'isolant thermique, soit en favorisant chimiquement le processus de corrosion. De même les caractéristiques de la chimie de l'eau agissent sur le type et le caractère de l'accumulation d'impuretés : à titre d'exemple, le rapport entre les composés de valence 2 et ceux de valence 3 dans l'eau du réacteur (par exemple Zn/Ni ou Fe respectivement) pourrait déterminer le type d'impuretés (spinelle par opposition à hématite) influant ainsi sur la vitesse de corrosion. L'expérience a montré que le facteur le plus important à prendre en considération lors de la mise en œuvre de stratégies chimiques est d'aborder simultanément la corrélation entre le dépôt d'impuretés et la cinétique de corrosion, car certaines pratiques qui peuvent être satisfaisantes pour un aspect, peuvent aller dans la direction opposée pour l'autre. De nouveaux

modèles de combustible et de cœur, un taux de combustion élevé et des cycles allongés du combustible sont des questions qui pourraient avoir une incidence sur l'accumulation d'impuretés liée à des modifications dans les matériaux de gainage, la superficie des surfaces et l'évolution de la puissance dans le temps. Aucune limite spécifique n'est directement imposée en ce qui concerne les niveaux maximaux admissibles d'impuretés, mais il faut prendre en considération l'influence de ces dernières tant sur les modèles thermiques que sur les modèles de la cinétique de corrosion.

Les critères relatifs au dépôt d'impuretés sont considérés comme des critères « dérivés », et seulement indirectement liés à la sûreté. On n'a probablement pas besoin de limites précises en l'occurrence, car des critères visant les phénomènes limitatifs (oxydation, hydruration, interaction pastille-gaine) sont déjà en place².

Les importants dépôts d'impuretés dans les REP sont un sujet de préoccupation, car ils conduisent à un prélèvement de bore, causant de ce fait une distorsion du profil de distribution axiale de la puissance dans le cœur et une réduction de la marge d'arrêt : cette question est examinée dans la section 5.6 du présent rapport.

Enfin, il faut noter que l'industrie s'emploie à améliorer la connaissance des effets possibles de la chimie de l'eau, sur la base des données d'expérience accumulées et de travaux de recherche, et à intégrer ces connaissances améliorées dans un certain nombre de guides d'exploitation des réacteurs à eau [3].

3.6 Niveau de déformation

Des limites de dimensionnement généralement empreintes de conservatisme sont adoptées pour la contrainte (par exemple, limite élastique ou résistance à la traction de 1 % à la température d'exploitation) ou la déformation (par exemple, 1 % au maximum pour la déformation élastique et plastique périphérique, et 2,5 % au maximum pour la déformation axiale et tangentielle permanente, causée par le gonflement du combustible, à la fin de la durée de vie). Les marges tirées de ces limites visant les contraintes et déformations effectives de rupture sont définies à partir de la base de données du fournisseur de combustible pour un combustible, un gainage et une fourchette de taux de combustion particuliers.

Ces limites, conjointement avec d'autres telles que l'interaction mécanique pastille-gainage (section 3.9) et la pression interne des barreaux combustibles (section 3.8), sont utilisées pour définir la limite thermomécanique propre au combustible ; cette limite est exprimée sous la forme d'une courbe de la puissance thermique linéique (en W/cm) fonction du taux de combustion. Cette courbe délimite de façon empreinte de conservatisme tous les phénomènes thermomécaniques ; elle est établie de manière à couvrir les excursions de puissance thermique/mécanique, qui sont de l'ordre de 10 à 50 % environ. Pour une analyse plus détaillée de la limite thermomécanique, voir la section 3.9.

Des analyses des contraintes et des déformations sont exécutées par le fournisseur de combustible, à l'aide de modèles qui font constamment l'objet de calculs repères de comparaison avec les données expérimentales disponibles. De tels calculs repères peuvent également être exécutés à l'aide de valeurs obtenues à partir de programmes de calcul perfectionnés relatifs aux performances du

2. D'importantes quantités imprévues d'impuretés ont récemment été observées dans la centrale nucléaire de River Bend (États-Unis) en liaison avec un certain nombre de défaillances du combustible. La cause profonde semble être une corrosion accélérée induite par la chaleur, imputable à des dépôts importants de fer et de cuivre associés à une excursion d'origine chimique au début du cycle d'exploitation.

combustible (par exemple, les programmes COMETHE ou ENIGMA). L'utilisation de tels programmes de calcul permet de modéliser le régime de fonctionnement attendu du combustible et, par conséquent, l'étude des effets des nouveaux modèles de cœur ou de pratiques d'exploitation inhabituelles ne soulève aucun problème particulier.

Du fait que ces propriétés mécaniques dépendent de la composition, de la fabrication, de la fluence et de la teneur en hydrogène des matériaux, elles seront de toute évidence affectées par les nouveaux éléments de dimensionnement, en particulier le taux de combustion élevé. Il s'ensuit que la vérification continue [4] des modèles de conception du combustible est essentielle pour faire en sorte que la conception et l'exploitation s'appuient sur une base appropriée.

3.7 Oxydation et hydruration

L'oxydation et l'hydruration sont directement liées au comportement du combustible au cours de l'exploitation normale, des transitoires et des accidents. L'oxydation dégrade les propriétés des matériaux, surtout la conductivité thermique de gainage (avec une augmentation secondaire de l'énergie emmagasinée dans le combustible) alors que l'hydruration conduit à la fragilisation ; ces phénomènes prennent une importance croissante à des taux d'irradiation plus élevés, car la dépendance vis-à-vis du taux de combustion n'est pas linéaire. Pour ces raisons, les matériaux de gainage en zircaloy ont été fortement optimisés au cours des 10 à 20 dernières années. En ce qui concerne les REB, l'optimisation a principalement été orientée vers la réduction de la corrosion nodulaire, en raison des défaillances du combustible liées à la corrosion localisée provoquée par le dépôt d'impuretés, qui se sont produites au cours des années 70 et au début des années 80 ; une optimisation trop poussée (avec des particules de phase secondaire de très petites dimensions) peut cependant exercer une influence néfaste sur la corrosion uniforme, ce qui fait que le choix des matériaux et des procédés de fabrication est un acte d'un équilibre délicat. Ces dernières années, d'autres matériaux ont été mis au point pour les REP, en plus du Zircaloy 4 standard (alliages Zr-Nb, par exemple).

Les taux de corrosion uniforme diffèrent selon qu'il s'agit de REP ou de REB. Avec une température nettement inférieure du réfrigérant en cours d'exploitation et le Zry-2 plus résistant à la corrosion comme matériau de base du gainage, la corrosion uniforme est beaucoup moins critique dans le cas des REB ; par comparaison, les REP sont beaucoup moins sujets à des phénomènes nodulaires ou locaux (par exemple, la corrosion localisée provoquée par le dépôt d'impuretés, la corrosion amplifiée par ombre) en raison de conditions de transfert thermique et d'écoulement beaucoup moins tyranniques.

À des fins de conception, on admet normalement en hypothèse des limites d'épaisseur d'oxydes et de concentration en hydrures à la fin de la durée de vie du combustible. Les valeurs sont habituellement de l'ordre respectivement de 100 μm et de 500-600 ppm ; ces valeurs sont tirées de « l'expérience » et représentent des limites supérieures assignées aux données mesurées sur du combustible irradié dans des réacteurs commerciaux. L'épaisseur d'oxyde de 100 μm représente également le niveau auquel il existe une forte augmentation de la probabilité d'écaillage de l'oxyde, qui aura une influence néfaste sur l'accroissement de l'hydruration et donc sur la poursuite de l'oxydation.

Dans plusieurs pays, les limites nominales d'une épaisseur moyenne d'oxydes au niveau du gainage en fin de vie du combustible de 100 μm et d'une concentration moyenne en hydrures de 500-600 ppm, sont effectivement devenues des critères de sûreté autorisés et/ou approuvés par le biais de

l'approbation des méthodologies de conception des fournisseurs de combustible³. En outre, des critères limitant le nombre de défauts du gainage dus à l'oxydation se rencontrent parfois. Dans d'autres pays, aucune limite explicite n'est définie ; dans tous les cas cependant, l'oxydation et l'hydruration sont prises en considération lorsque l'on analyse les propriétés du gainage afin de procéder à des évaluations de la conception liées aux contraintes et aux déformations.

Un effet de l'oxydation, qui n'a pas beaucoup retenu l'attention dans le passé et qui pourrait être important, est l'oxydation interne du gainage induite par le colaminage du combustible. Lorsque le taux de combustion augmente, l'intervalle entre pastilles et gaine dans les barreaux combustibles tend à se refermer par suite du gonflement et de la déformation diamétrale du gainage et une couche d'adhérence se forme entre la pastille et la gaine. Cette adhérence peut avoir pour effet de détériorer le comportement du combustible sous irradiation. Elle empêche le transport axial des gaz de fission dans un barreau combustible et induit une interaction mécanique intense entre la pastille et le gainage. Du fait de l'adhérence, l'oxydation interne du gainage du combustible devient de plus en plus importante en fonction du taux de combustion du combustible. À taux de combustion élevé du combustible, l'effet d'adhérence est important ; l'adhérence complète se produit à un taux de combustion du combustible d'environ 50 MWj/kg. L'adhérence entraîne la diffusion de produits de fission tels que I, Cs et Cd à l'intérieur du gainage. Ces effets sont la cause d'une oxydation interne et d'une fragilisation de la gaine du combustible et devraient être pris en considération lorsqu'on évalue les effets de l'oxydation.

Dans certains pays, il n'existe pas de critères officiels liés à l'épaisseur d'oxydes et à la concentration en hydrures. Cela a été considéré comme justifié par le fait que l'épaisseur d'oxydes et la concentration en hydrures ne sont pas directement responsables de la défaillance du combustible. Cependant, les oxydes et les hydrures influent sur le comportement du matériau de gainage du point de vue des contraintes et des déformations, et en fin de compte sur sa résistance à la rupture. Il existe une influence directe évidente sur l'état initial du barreau combustible admis en hypothèse dans les analyses de transitoires et d'accidents, de même que sur le niveau des paramètres de sûreté pertinents tels que la température du combustible et la pression interne. En conséquence, il convient encore d'envisager d'imposer des limites à l'épaisseur d'oxydes et à la concentration en hydrures.

Des questions supplémentaires, telle que l'écaillage (la desquamation) de la couche d'oxyde recouvrant le gainage et des concentrations locales en hydrures très élevées dans la paroi du gainage, ne sont pas couvertes par les limitations actuelles. De même, du point de vue du comportement en cas d'APRP, une teneur élevée en hydrogène (égale ou supérieure à 200 ppm) peut entraîner une dégradation grave de la résistance à la trempe (Cf. les données relatives à l'essai français HYDRAZIR).

Des travaux de recherche détaillés, comprenant des essais relatifs aux vitesses de corrosion et des programmes d'inspection du combustible dans les centrales nucléaires commerciales ont conduit à définir une base pour des taux de combustion atteignant 50 MWj/kg ; on dispose également d'une certaine quantité de données pour des taux de combustion même supérieurs. Un gainage comportant de nouveaux alliages de zirconium et des gaines de combustible de type à couches multiples ont été mis au point ces dernières années et testés sous irradiation dans des centrales nucléaires commerciales (assemblages d'essais principaux ou barreaux, certains de ces programmes ayant ultérieurement donné lieu des essais destructifs). De tels essais permettront d'obtenir des données couvrant l'exploitation normale du cœur et devront être poursuivis de manière à porter le taux de combustion du combustible bien au-delà du niveau de 50 MWj/kg. En outre, il faudra procéder à

3. Malheureusement, l'interprétation de ces critères n'est pas dénuée d'ambiguïté, car la région du gainage sur laquelle cette moyenne est établie est souvent mal définie.

des essais de manière à couvrir le comportement du combustible au cours de transitoires et d'accidents.

En résumé, étant donné que la corrosion du Zircaloy constitue probablement l'un des principaux paramètres qui limitent la durée de vie du combustible nucléaire, il est justifié d'examiner le caractère adéquat des limites actuellement applicables aux niveaux maximaux d'oxydation et d'hydruration locales dans le gainage, en particulier sous l'angle du comportement du combustible fortement irradié.

3.8 Pression interne des gaz

La libération de gaz de fission et la pression interne qui en résulte dans le barreau combustible, est un aspect important du comportement du combustible. Traditionnellement, il a constitué un facteur limitatif dans la fixation de la limite thermomécanique (voir également la section 3.9). La libération de gaz de fission est tributaire :

- a) de la microstructure et de la chimie du combustible ;
- b) de son évolution dans le temps ; et
- c) la température du combustible qui est fortement influencée par la puissance nominale et le taux de combustion.

À taux de combustion élevé (supérieur à 40-50 MWJ/kg) la libération de gaz de fission tend à augmenter rapidement. De plus, les expériences disponibles portant sur la libération de gaz de fission dans des conditions transitoires, indiquent des libérations très fortes de gaz de fission dans la région de taux de combustion élevée du combustible ; en outre, la libération de gaz de fission est fortement influencée par la formation à la surface du combustible du bourrelet périphérique (effet « rim ») à taux de combustion élevé, qui revêt une importance particulière pour les conditions de transitoires et/ou d'accidents. Ces phénomènes ne sont pas encore bien compris, et les outils analytiques existants ne permettent pas de les prévoir de façon satisfaisante.

Des augmentations de la libération des gaz de fission peuvent conduire à des pressions internes élevées dans les barreaux combustibles et pourraient aussi entraîner une détérioration de la conductivité thermique du gaz dans la chambre d'expansion et, fait très important, du transfert thermique entre les pastilles et le gainage en raison de la modification de la taille de l'intervalle entre combustible et gaine qui en résulte. Les gaz de fission Xe et Kr diminuent la conductivité thermique de l'hélium gazeux dans cet intervalle, ce qui accroît la température du combustible ; lorsque l'intervalle est fermé, l'effet devient moins important. Cela induit un mécanisme de contre-réaction, car une augmentation de la température du combustible amplifie la libération des gaz de fission. En raison du mécanisme de contre-réaction thermique susmentionné, la libération de gaz de fission dans divers barreaux peut être fort irrégulière. Les pressions internes élevées dans les barreaux peuvent avoir un effet important sur le comportement du gainage (ballonnement, éclatement, etc.) au cours de transitoires ou d'accidents hypothétiques. Par exemple, au cours d'un APRP, la différence de pression de part et d'autre du gainage peut s'inverser en quelques secondes du fait de la chute de pression précoce dans l'ensemble du système.

Deux autres critères possibles visant la pression interne acceptable des gaz sont actuellement utilisés dans divers pays par leurs organismes de réglementation. Dans la première option, la pression interne des barreaux est maintenue en dessous de la pression nominale dans le circuit primaire principal (CPP) au cours de l'exploitation normale afin d'empêcher le fluage vers l'extérieur du

gainage. Dans l'autre option, la pression interne des barreaux peut excéder la pression dans le CPP, mais est limitée de manière à ce que le taux de fluage instantané du gainage vers l'extérieur imputable à une pression interne des barreaux supérieure à la pression du circuit primaire principal, ne dépasse pas selon toute probabilité le taux de gonflement instantané du combustible, autrement dit que l'intervalle entre combustible et gainage ne s'ouvre pas (c'est le critère dit « sans décollement »). À taux de combustion élevé, cela pourrait, dans des conditions de transitoire ou d'accident, entraîner une pression très élevée dans le barreau combustible, avec l'énergie emmagasinée élevée qui en découle, le ballonnement et l'éclatement du gainage, ce qui pourrait remettre en question la possibilité de refroidissement du cœur, et ainsi le niveau et/ou les limites résultant de ce critère de sûreté.

En eux-mêmes, ces critères ne devraient pas être affectés par les nouveaux éléments de dimensionnement, bien que les méthodes permettant de démontrer la conformité à ces critères le soient.

En outre, on a constaté que le combustible MOX produit une plus forte libération de gaz de fission que le combustible à l' UO_2 . On observe une accélération de la libération des gaz de fission en fonction de l'irradiation, également en raison du taux linéaire de production de chaleur plus élevé dans le combustible MOX imputable à un niveau plus élevé de la réactivité. Plus que les critères eux-mêmes, le problème en l'occurrence est de démontrer la conformité aux critères. L'évolution de la pression interne des barreaux en tant que fonction du taux de combustion dans le cas du combustible MOX, doit être bien caractérisée, compte tenu également de la méthode de production et de la teneur en plutonium du combustible MOX. Les conséquences de la montée en pression à l'intérieur du barreau doivent aussi être soigneusement étudiées. Une étude de ce type, la série d'essais de décollement (IFA 610) exécutée à l'aide de barreaux de combustible UO_2 et MOX irradiés à 50-60 MWj/kg, est actuellement menée dans le réacteur de recherche de Halden. S'agissant du barreau d' UO_2 , le décollement se produit à une pression de l'ordre de 130 bars ; les premiers résultats relatifs au barreau de combustible MOX indiquent une pression de décollement encore plus élevée. Sur la base des résultats obtenus à Halden, un critère 'sans décollement' plus élaboré a été proposé par certains fournisseurs, prenant en considération le taux de fluage vers l'extérieur et/ou la déformation et la contrainte de tension imputables à la surpression.

Pour un examen des effets possible des nouveaux éléments de dimensionnement sur la limite thermomécanique (puissance linéique), voir la section 3.9.

3.9 Charges thermomécaniques, interaction mécanique pastille-gainage

L'interaction mécanique pastille-gainage (IMPG) vise la contrainte s'exerçant sur le gainage à partir d'une pastille qui se dilate, en particulier au cours d'un transitoire. La dilatation de la pastille résulte principalement de la dilatation thermique, et si la contrainte est suffisamment importante, elle peut entraîner la rupture du gainage. L'interaction mécanique pastille-gainage diffère du phénomène connexe d'interaction pastille-gainage (IPG) (voir section 3.10) dans la mesure où ce dernier vise des rampes de puissance dans lesquelles la contrainte est maintenue pendant une longue période et une corrosion est nécessaire pour que la fissuration se produise.

La prévention de la rupture mécanique de la gaine au cours des transitoires imputable à l'interaction mécanique pastille-gainage, qui constitue le critère de sûreté fondamental, est habituellement couverte par la limite fixée à 1 % de la déformation (plastique et élastique) uniforme du gainage, comme cela a déjà été indiqué dans la section 3.6.

Une gamme de transitoires de montée en puissance dans lesquels l'interaction mécanique pastille-gainage peut être importante, est traitée dans les rapports finals de sûreté et les analyses de

sûreté relatives aux autorisations de rechargement (par exemple, échauffement par perte d'eau alimentaire dans un REB et rupture de tuyauterie vapeur dans un REP). Si la déformation due à l'interaction mécanique pastille-gainage est suffisamment faible ou si la ductilité du gainage est suffisamment élevée, l'interaction mécanique pastille-gainage ne constituera pas le mécanisme de rupture du gainage. Dans ces cas, la température du gainage augmenterait en raison de l'accroissement de puissance, et finalement le flux thermique critique pourrait être dépassé et conduire à un endommagement du gainage. Dans le cas de ces derniers transitoires, les critères d'intégrité du combustible correspondant au rapport de puissance critique et/ou au REC sont généralement limitatifs, et ces transitoires sont habituellement analysés de ce point de vue (autrement dit sans considérer l'interaction mécanique pastille-gainage).

Plusieurs facteurs seraient susceptibles d'intervenir à taux de combustion élevé, qui pourraient entraîner une défaillance précoce du gainage par IMPG. Premièrement, l'intervalle entre pastille et gaine se referme lorsque le taux de combustion augmente, éliminant en partie la possibilité de dilatation libre de la pastille avant contact avec le gainage. Deuxièmement, l'importante quantité de gaz de fission, accumulés aux joints de grains de combustible, se dilatera aussi pendant une montée en puissance, ce qui contribuerait aussi à la déformation du gainage. Troisièmement, la ductilité du gainage est notablement réduite par la fragilisation due à l'irradiation, déjà à irradiation moyenne, de sorte qu'une défaillance mécanique devient plus probable. Quatrièmement, l'hydruration du gainage réduit encore la ductilité à irradiation élevée principalement aux températures plus basses du gainage. Dans ces conditions, des défaillances par interaction mécanique pastille-gainage pourraient aussi se produire dans le cas des transitoires qui étaient auparavant limités par les critères correspondant au rapport de puissance critique et/ou au REC, et ainsi le type d'analyse fondé sur le flux thermique critique ne conviendrait donc pas à l'évaluation de sûreté.

Des données expérimentales relatives à l'interaction mécanique pastille-gainage dans le cas du combustible de REO ont été obtenues par exemple grâce au projet de réacteur de Halden et au programme international de R-D de la société Belgonucléaire, couvrant une gamme de taux de combustion atteignant 60 MWj/kg ; jusqu'à présent, aucun de ces résultats n'indique que les effets de l'interaction mécanique pastille-gainage sont prohibitifs à taux de combustion élevé. Cependant, étant donné que ces expériences ont habituellement pour objet d'étudier d'autres effets du taux de combustion élevé tels que la libération des gaz de fission, et donc que les données relatives à l'interaction mécanique pastille-gainage ont été obtenues « par la bande », il semble justifié de procéder à des essais supplémentaires directement centrés sur l'interaction mécanique pastille-gainage.

En résumé, il subsiste certaines préoccupations concernant l'effet du taux de combustion élevé que l'on devrait examiner en procédant à davantage d'essais directement axés sur l'interaction mécanique pastille-gainage. Il est possible d'utiliser des programmes de calcul de conception et de performance du combustible, à condition qu'ils aient fait l'objet de calculs repères, d'une validation et d'une vérification appropriés par comparaison aux données expérimentales. Par ailleurs, quelques travaux supplémentaires d'expérimentation visant l'interaction mécanique pastille-gainage en vue de tester ces programmes de calcul à l'aide de calculs repères et d'en vérifier les résultats, semblent se justifier.

La **limite thermomécanique** (courbe fonction du taux de combustion) est définie compte tenu du phénomène d'interaction mécanique pastille-gainage, de même que des divers autres phénomènes (pression interne des barreaux de combustible, contrainte/déformation, fatigue, fusion du combustible, corrosion et gonflement de la gaine) qui ont été examinés ailleurs dans le présent rapport. Cette limite est fixée de manière à couvrir tous ces effets ; de plus, la limite comprend l'effet de la surpuissance thermique et mécanique au cours des transitoires normaux (incidents de fonctionnement prévus). D'habitude, cela implique l'adoption d'hypothèses empreintes de conservatisme pour traiter

les incertitudes dans divers domaines : modèles et paramètres des modèles (libération des gaz de fission, par exemple), tolérances de fabrication, et gestion du combustible et/ou du cœur (historique de la puissance en cours d'exploitation, par exemple). Ainsi, il existe un surcroît de conservatisme, la marge par rapport à la limite réelle (nominale) n'étant pas bien quantifiée.

Dans les méthodologies modernes de conception du combustible, la démarche est différente, à savoir – à l'instar de la démarche adoptée pour établir la limite de sûreté correspondant au rapport de puissance critique et/ou au REC – elle repose sur une base statistique. Les paramètres dans les domaines mentionnés plus haut sont traités sous forme de distributions assorties d'incertitudes de type réaliste, et un modèle utilisant la méthode de Monte Carlo fait varier tous ces paramètres en vue de calculs multiples des importantes caractéristiques de dimensionnement (pression interne des barreaux, par exemple). Avec une limite de conception et/ou de sûreté connue, la marge requise peut alors être déterminée.

Afin de couvrir convenablement les modèles modernes de combustible et de cœur, les méthodes empreintes de conservatisme déjà mentionnées, parallèlement à l'analyse des incertitudes connexes, devront généralement être appliquées afin de réduire le conservatisme superflu. Cela implique toutefois la nécessité de bien valider et vérifier de telles méthodologies ; ainsi, il faut que des essais expérimentaux pour continuer de fournir les bases d'une telle vérification et validation.

Le critère de sûreté fondamental – la prévention de la rupture mécanique de la gaine – n'est pas affecté par les nouveaux éléments de dimensionnement, cependant la limite actuelle (déformation de 1 %) peut changer.

3.10 Interaction pastille-gaine (IPG)

Les défaillances par interaction pastille-gaine (IPG) sont imputables à la fissuration par corrosion sous contrainte du matériau de gainage, qui est liée à des rampes de puissance locales au cours du démarrage ou de manœuvres du réacteur (par exemple, ajustements et/ou échanges de barreaux, suivi de charge). La contrainte résultant de l'augmentation de puissance et le niveau de corrosion du gainage sont l'une et l'autre les conditions requises d'une IPG. Une fissure, dont l'amorce se situe au niveau d'un défaut microscopique du gainage, se propage jusqu'à ce que la contrainte dans la partie restante du gainage supportant la charge dépasse la charge limite de rupture, entraînant la défaillance. Les barreaux de combustible neuf ne deviennent pas défectueux par IPG, pas plus que les barreaux combustibles exploités à puissance constante.

Le phénomène d'IPG a fait l'objet d'études détaillées à la suite de multiples défaillances par IPG survenues au cours des années 70. Afin de maîtriser le phénomène d'IPG, on a mis en œuvre des règles d'exploitation (également dénommées recommandations en matière de gestion de l'exploitation intérimaire du préconditionnement) en vue de limiter les augmentations de puissance locale et de « conditionner » le combustible aux variations continues de puissance. Ces règles sont habituellement fonction de l'irradiation (à taux de combustion plus élevé, le combustible est moins capable de résister aux variations continues de puissance) et diffèrent selon les divers types de combustible. Afin d'établir et de valider ces règles, des essais complets portant sur des rampes de puissance ont été exécutés – notamment dans les réacteurs d'essai de Studsvik et de Petten ; ainsi, le seuil de défaillance du gainage est très bien connu jusqu'à 40-50 MWj/kg et pour des rampes de puissance dépassant largement l'exploitation normale. Une certaine quantité d'essais de rampes de puissance a aussi été exécutée ultérieurement à des taux de combustion plus élevés (atteignant 60 à 70 MWj/kg), par exemple en France. La vérification de ces règles a été exécutée dans diverses centrales nucléaires commerciales.

Les limites et/ou règles relatives à l'IPG contiennent habituellement une pente maximale de la rampe pour l'augmentation de la puissance (en W/cm/h), un « pas discret » maximal d'augmentation de la puissance (W/cm), et un seuil (en W/cm) au-dessus duquel de telles limitations de l'augmentation de puissance s'appliquent, et une période de temps minimale après laquelle le combustible peut être considéré comme (pré)conditionné à des rampes de puissance plus importantes.

Au cours des années 80 et 90, des types de combustible résistant à l'IPG ont été mis au point sur la base d'une petite couche de zirconium (« barrière » ou « garniture » avec ou sans petits additifs tels que Sn ou Fe) sur la face interne de la gaine à titre de parade plus durable. D'autre part, les modèles modernes d'assemblages combustibles contiennent davantage de barreaux combustibles et donc ont une puissance thermique linéique inférieure pour chaque barreau : de cette manière, le combustible peut en permanence fonctionner en dessous du seuil d'IPG et ainsi ne présente pas de risque d'IPG.

Le mécanisme d'IPG est sensible à la composition du gaz dans l'intervalle entre combustible et gaine. A taux de combustion élevé (supérieur à 40 MWj/kg) la libération de gaz de fission prend une importance croissante et, en raison de quantités accrues d'iode, de cadmium et de césium libérées, la composition des gaz dans l'intervalle est plus agressive et peut amplifier la défaillance du gainage du combustible induite par l'IPG. Étant donné que la libération de gaz de fission à partir des pastilles de combustible MOX sera différente de celle à partir des pastilles d'UO₂, on s'attend aussi à un effet MOX. Par ailleurs, l'interaction mécanique entre le gainage et les pastilles de combustible (adhérence) devient un phénomène de plus en plus important dans la zone de taux de combustion élevé. Pour ces raisons, il importe de poursuivre l'exécution d'essais de variations continues de la puissance, en particulier dans la région à taux de combustion élevé, afin d'établir convenablement des valeurs-seuils d'IPG. Ceci est tout aussi important dans la perspective de l'introduction de nouveaux matériaux de gainage.

Au cours des conditions transitoires, il faut tenir compte du mécanisme de défaillance du combustible par IPG. Ce mécanisme peut être important dans des transitoires tels que l'extraction par erreur de barres de commande et, d'une façon générale, au cours de transitoires de sous-refroidissement (eau froide). Il convient toutefois de ne pas oublier que de telles défaillances ont trait à du combustible antérieurement intact et donc que les conséquences radiologiques de tels transitoires sont normalement mineures.

Généralement, les limites (règles) d'IPG ne font pas l'objet d'autorisations ; chaque centrale nucléaire est conçue pour faire face à un certain nombre de petites défaillances du combustible, et les limites fixées dans les spécifications techniques (en particulier le niveau de concentration de l'¹³¹I dans le réfrigérant primaire) limiteront l'exploitation de la centrale.

Néanmoins, les règles d'IPG concernent effectivement la sûreté du comportement du combustible, et les autorités de sûreté soutiendront que, pour des combustibles non résistants à l'IPG, ces limites conviennent et que les centrales nucléaires doivent se conformer à ces règles dans l'exploitation du cœur. Les limites d'IPG devraient être tenues à jour afin de correspondre au modèle de combustible et de cœur envisagé en l'occurrence ; pour ce faire, on a principalement recours à des essais de rampes de puissance.

On dispose à l'heure actuelle d'une bonne base pour les limites d'IPG pour des taux de combustion atteignant jusqu'à 50 MWj/kg. Il est recommandé de poursuivre les essais de rampes de puissance afin d'améliorer cette base à des taux de combustion supérieurs et correspondant au modèle de combustible adopté. Parallèlement, il convient de poursuivre la mise au point des modèles de performance du combustible et de les tester à l'aide de calculs repères par rapport aux résultats de ces

essais de rampes de puissance ; enfin, avec une modélisation suffisante, il serait possible de réduire l'importance des travaux d'essai requis.

3.11 Fragmentation du combustible (RIA)

Afin d'éviter la perte d'une configuration permettant le refroidissement et les à-coups de pression du réfrigérant, des critères de valeur maximale de l'enthalpie du combustible sont utilisés en tant que limites pour les accidents de réactivité (RIA). À ce jour, une valeur de l'enthalpie de 280 cal/g a été utilisée aux États-Unis et dans d'autres pays sur la base de données tirées de mesures de fragmentation précoce en cas de RIA antérieures à 1974 (essais réalisés dans les installations SPERT et TREAT aux États-Unis) ; cette valeur correspond à la fusion de l' UO_2 qui provoque la fragmentation du gainage et l'expulsion de particules combustibles. L'expulsion de combustible fondu a également entraîné des interactions énergétiques combustible-réfrigérant qui ont engendré des à-coups de pression. Des déterminations plus précises ultérieures des mesures et de la définition de la valeur de l'enthalpie correspondant à la fragmentation [5], de même que des calculs exécutés plus tard à l'aide du programme FRAP-T et les essais d'accident de réactivité dans l'installation PBF ont conduit à des réductions de la limite de 280 cal/g. En conséquence, diverses autorités de sûreté utilisent une valeur inférieure pour la limite d'enthalpie.

Les données primitives obtenues dans les installations SPERT et TREAT indiquaient que le dépôt total d'énergie de 280 cal/g était empreint de conservatisme, s'agissant de faire en sorte que l'endommagement du cœur soit minimal et que la possibilité de refroidissement du cœur soit maintenue. Certains de ces essais ont aussi indiqué qu'un barreau combustible soumis à une valeur maximale selon la direction axiale de l'enthalpie radiale moyenne du combustible de 280 cal/g sera gravement endommagé, perdra sa configuration initiale et compromettra le refroidissement post-accidentel ; sur cette base un critère révisé de 230 cal/g a été recommandé [5]. Parallèlement, la question de savoir si cette limite devrait être identique pour du combustible non irradié et irradié a été soulevée (cf. résultats de l'essai RIA1-1 dans l'installation PBF). De même, un groupe de travail international de l'industrie, dirigé par l'Institut de recherches sur l'énergie électrique [*Electric Power Research Institute – EPRI*], a suggéré une valeur de l'ordre de 240 cal/g pour le combustible neuf et faiblement irradié.

De récentes expériences dans le réacteur d'essai français CABRI et dans le réacteur d'essai japonais NSRR à l'aide d'échantillons de combustible à taux de combustion élevé ont abouti [5] à une dispersion des particules combustibles pour des dépôts d'énergie nettement inférieurs à 200 cal/g. Il est manifeste que, pour du combustible à fort taux de combustion, un mécanisme autre que la fusion du combustible provoque la dispersion de particules pour de faibles dépôts d'énergie. Il est possible que ce nouveau mécanisme soit lié à l'importante accumulation de bulles de gaz de fission aux joints des grains du combustible et à la rapide expansion de ces gaz au cours des pointes de puissance, qui revêtent une importance particulière dans la zone dite du « rim » de l' UO_2 et dans les amas de MOX. L'entraînement de particules dans les gaz de fission qui s'échappent, peut aussi intervenir. Divers facteurs (largeur de l'impulsion, type de gainage, type de réfrigérant, pression interne, température du réfrigérant), dont certains ne sont pas encore parfaitement compris, peuvent jouer un rôle : cependant, l'effet du taux de combustion dans l' UO_2 est évident.

La formation, dans le matériau combustible, d'une zone périphérique à forte teneur de plutonium et donc à réactivité élevée, à structure poreuse et à forte teneur en produits de fission, dite « rim », qui s'accroît en fonction de l'irradiation, revêt un intérêt particulier : à environ 45 MWj/kg, la zone du « rim » est de l'ordre de 200 μm . Des études fondamentales sont actuellement menées en vue

d'élucider la nature du rôle joué par la zone du « rim » dans les situations de transitoires et/ou d'accidents.

Du fait que la structure des pastilles et la libération de gaz de fission à partir des pastilles de combustible MOX seront différentes de celles des pastilles d'UO₂, un effet MOX supplémentaire s'observe également [17, 18].

En résumé, du point de vue de la sûreté, on considère que la vérification analytique du respect de la limite de l'ordre de 230 à 280 cal/g environ, peut fort bien être suffisante pour assurer une configuration permettant le refroidissement dans le cas du combustible neuf ou très peu irradié. Pour l'évaluation de cette limite à forts taux de combustion, il est nécessaire de mieux comprendre le processus de fragmentation et les effets sur celui-ci des taux de combustion élevés (en particulier, l'effet de la zone du « rim » et des amas de MOX). La vérification par comparaison avec des expériences plus réalistes de RIA (prévues à l'aide de la boucle à eau sous pression dans le réacteur CABRI) est donc souhaitable. Cette meilleure compréhension devrait aussi contribuer à une modélisation améliorée à l'aide de programmes de calcul des performances du combustible. (voir section 4).

3.12 Défaillance du combustible (RIA)

Pour un accident de réactivité, le nombre de barreaux combustibles défectueux doit être calculé de manière à pouvoir estimer les doses d'irradiation délivrées au public. Dans la plupart des pays, la limite actuelle de défaillance du combustible est fondée sur la définition visée à la section 4.2 du « Standard Review Plan » (plan standard d'examen) américain [7] comme étant une valeur maximale selon la direction axiale de l'enthalpie radiale moyenne du combustible de 170 cal/g pour les REB et un critère d'échauffement critique pour les REP. Sur la base de quelques-unes des expériences d'accidents de réactivité exécutées dans les réacteurs CABRI et NSRR au cours des années 90 à l'aide de barreaux combustibles à un taux de combustion égal ou supérieur à environ 50 MWj/kg, il a paru souhaitable d'évaluer le bien-fondé de cette limite. À ce propos, diverses valeurs de cette limite sous forme de fonction du taux de combustion ont été proposées sur la base soit d'interprétations directes de données expérimentales, soit de paramètres pertinents, tels que l'épaisseur de la couche d'oxydes du gainage.

Les résultats de tous les essais visant les accidents de réactivité (exécutés dans les installations SPERT et PBF ou dans les réacteurs CABRI et NSRR) à l'aide de combustible à gaine de zircaloy au-dessus de 5 MWj/kg mettent en évidence des défaillances dues à l'interaction mécanique pastille-gainage plutôt que des défaillances à haute température liées au flux thermique critique [8]. On estime que la réduction de l'intervalle et de la ductilité imputable au fluage et à la fragilisation dus à l'irradiation et/ou à l'absorption d'hydrogène, est responsable de la modification du mécanisme de défaillance du gainage dans le cas du combustible irradié (dans le cas de la zone du « rim » pour l'UO₂ ou des amas de MOX, le gonflement du combustible provoqué par les gaz de fission constitue un autre facteur en cause). Ainsi, les effets de la combustion nucléaire semblent altérer le mécanisme de défaillance et invalider les critères du flux thermique critique. Étant donné que la ductilité sera aussi fortement affectée par des modifications apportées au matériau de gainage (par exemple, l'utilisation de Nb comme agent d'alliage), les effets des nouveaux matériaux de gainage sur la défaillance du combustible en cas d'accident de criticité peuvent aussi être importants. Par exemple, les essais exécutés dans le réacteur IGR à l'aide de combustible de VVER gainé de Zr-1 % Nb révèlent un comportement entièrement ductile sans défaillance par interaction mécanique pastille-gaine même à taux de combustion élevé (ces essais ont été exécutés avec une largeur d'impulsion d'environ 700 ms) ; les essais dans le réacteur BIGR n'ont pas révélé de défaillance par interaction mécanique

pastille-gainage jusqu'à des valeurs de l'enthalpie de 160 cal/g à 48 MWj/kg (la largeur d'impulsion étant en l'occurrence de 3 ms) [9].

Ainsi, en particulier aux taux de combustion plus élevés pour lesquels les données expérimentales font défaut, il convient de poursuivre l'établissement de critères de sûreté fondés sur des facteurs techniques et la vérification des modèles analytiques relatifs au comportement du combustible. En l'occurrence le futur programme expérimental réalisé dans le réacteur CABRI, dont l'installation expérimentale sera modifiée afin d'inclure une boucle à eau sous pression de REP, est susceptible de fournir des résultats très intéressants. L'importance de l'état après échauffement critique a déjà été démontrée lors des premiers essais dans l'installation PBF [5] portant sur du combustible neuf, qui ont abouti à une forte oxydation et à une fragilisation au cours de l'ébullition par film, et la rupture du gainage ainsi que la pulvérisation du combustible pendant la trempe du barreau ; en conséquence, des recherches supplémentaires visant le combustible à taux de combustion élevé semblent se justifier, et la boucle à eau du réacteur CABRI pourrait être très utile pour de telles recherches.

Par ailleurs, les résultats des essais exécutés dans le réacteur NSRR et de ceux portant sur des effets distincts dans des installations telles que PROMETRA, PATRICIA, SILENE (France), ainsi que les données obtenues grâce aux programmes d'essai de l'ANL [13] (États-Unis) et du JAERI [17] (Japon) devraient fournir des informations intéressantes.

3.13 Fragilisation du gainage/température de pointe du gainage (emballement de la réaction d'oxydation hors APRP)

Certains accidents, autres que des APRP, sont analysés en vue d'estimer les doses d'irradiation délivrées au public et de démontrer que la possibilité de refroidissement du cœur est maintenue. Pour des accidents tels que l'accident par blocage du rotor dans un REP, l'échauffement critique est utilisé pour déterminer la défaillance du gainage en vue des calculs de dose, et une température de 2 700°F est parfois employée pour démontrer la possibilité de refroidissement. La limite de 2 700°F a été tirée de premières estimations de la limite de défaillance du combustible pour des conditions d'APRP (2 700°F et couche d'oxydation atteignant 17 % de l'épaisseur du gainage par une réaction métal-eau). Cette limite a été établie au cours de la période 1969-1971, avant les enquêtes sur le circuit de refroidissement de secours du cœur menées aux États-Unis, qui ont abouti à une limite de température inférieure pour l'analyse des APRP (2 200 F soit 1 204°C). La raison justifiant le maintien d'une limite de température plus élevée pour les transitoires hors APRP était que ces transitoires étaient de brève durée et que les barreaux combustibles pouvait résister brièvement à l'échauffement critique sans subir de graves dommages.

Le critère de la température de pointe du gainage est une mesure de l'importance de l'oxydation qui peut se produire au cours du transitoire et de la perte connexe de ductilité. Étant donné que l'oxydation et l'absorption d'hydrogène se produisent aussi en cours d'exploitation normale, il en résultera une réduction supplémentaire de la ductilité à taux de combustion élevé. C'est pourquoi, la température de pointe du gainage au cours du transitoire peut devoir être ajustée pour prendre en compte la corrosion normale. Comme la ductilité du gainage dépend aussi des matériaux de gainage (par exemple, l'utilisation de Nb comme agent d'alliage), il y a aussi lieu de s'attendre à un effet des matériaux de gainage en ce qui concerne ce critère.

Le comportement du combustible fortement irradié dans ces conditions est relativement mal connu. La pertinence du critère susmentionné devrait donc être confirmée par voie expérimentale.

3.14 Fragilisation et/ou oxydation du gainage (APRP)

Pour l'analyse des APRP, il est généralement admis qu'une certaine quantité de barreaux combustibles deviennent défectueux et libèrent des produits de fission, mais que les systèmes de refroidissement de secours du cœur fonctionnent de manière à ce que la fragmentation des barreaux combustibles soit évitée, préservant ainsi une configuration permettant le refroidissement, et assurent en outre le refroidissement à long terme du cœur. Sur la base de nombreux essais de trempe et de ductilité exécutés en laboratoire à l'aide de tubes de zircaloy non irradiés, on a constaté que le gainage n'est pas susceptible de devenir suffisamment fragile pour se fragmenter, si la température de pointe du gainage demeure inférieure à 2 200°F (1 204°C) et à condition que l'oxydation totale ne dépasse pas 17 % de l'épaisseur du gainage avant oxydation. Les critères de fragilisation (cf. 10 CFR 50.46) sont largement utilisés, bien que, dans certains cas, la limite d'oxydation soit fixée à 15 % (au Japon, par exemple).

De plus, il existe une limite relative à la production d'hydrogène en cas d'APRP, cependant cette dernière vise l'intégrité de l'enceinte de confinement plutôt que la protection contre la fragilisation (la limite étant habituellement fixée à 1 % de l'oxydation totale possible du gainage).

Les critères de fragilisation et/ou oxydation ont été mis au point au cours des années 60 et au début des années 70 ; la vérification expérimentale et la validation ont inclus des essais à l'aide de combustible peu ou pas irradié. À l'heure actuelle, l'exploitation du combustible accuse des niveaux d'oxydation atteignant jusqu'à 100µm et des concentrations d'hydrogène atteignant jusqu'à 500 ppm au déchargement (ces niveaux sont habituellement utilisés comme critères pour le dimensionnement mécanique du combustible, qui deviennent souvent des limites autorisées, voir section 3.7). En conséquence, le critère de 17 % est désormais souvent interprété comme le niveau d'oxydation « totale ». Comme le processus d'oxydation aux températures des APRP diffère de celui aux températures normales d'exploitation, cette interprétation peut être considérée comme étant empreinte d'un très grand conservatisme ; la question de savoir si l'oxydation en cours d'exploitation normale doit être prise en compte lorsque l'on procède à des comparaisons avec la limite de 17 % correspondant aux APRP n'est pas réglée et sera, espère-t-on, résolue, grâce aux expériences en cours en France [10] et au Japon [17], de même que prévues à l'ANL [13]. Un critère différent, qui pourrait peut-être mieux convenir en particulier à taux de combustion élevé, pourrait aussi être envisagé.

Il existe un certain nombre de questions et de préoccupations qui appellent une vérification supplémentaire et une justification ou un ajustement en conséquence des limites actuelles visant les APRP. Certaines de celles-ci ont trait au taux de combustion élevé :

- conséquences radiologiques : importance de l'éclatement de barreaux et de la libération de produits de fission ;
- conséquences de l'effet stabilisateur de la phase β induite par l'hydrogène sur la déformation de la gaine ;
- conséquences de la fragmentation fine du combustible, remplissant l'espace dans la gaine gonflée (de plus, le moment auquel se produit l'affaissement de la colonne de combustible dans la zone gonflée étant important, de même que les conséquences du surcroît de chaleur résiduelle lié à la température et à l'oxydation du gainage) ;
- comportement de la gaine en cours de trempe et de refroidissement à long terme : modifications de la vitesse d'oxydation et de la fragilisation de la gaine, gonflement du combustible imputable aux gaz de fission au niveau de la zone du « rim » pour l' UO_2 ou des amas de MOX (les pertes de résistance mécanique pouvant devenir importantes, si la résistance de la paroi de la gaine est notablement affaiblie au cours de l'irradiation) ;

- précision de la modélisation, par exemple calcul de l'épaisseur de la gaine après éclatement ou justesse de la corrélation de Baker-Just relative à l'oxydation ;

alors que d'autres sont de nature plus générique :

- déplacement du combustible dans la région du gonflement ;
- blocage possible des sous-canaux.

Certaines des préoccupations et questions mentionnées plus haut pourraient fort bien être traitées par l'exécution d'expériences hors-réacteur (en cellule chaude, par exemple) visant le gonflement, la corrosion et la rupture. Il existe déjà un certain nombre de programmes de recherche qui sont en cours (par exemple, en France : TAGCIS, TAGCIR, HYDRAZIR [11], CINO, EDGAR[11] et au Japon au JAERI [17]) ou ont été entrepris (par exemple aux États-Unis à l'ANL [12], avec un programme d'essai très complet) qui comportent des essais aussi bien intégraux que portant sur des effets distincts.

La Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis (USNRC) a procédé au cours d'un passé récent à l'examen des prescriptions de l'Appendice K du titre 10 du Code de réglementation fédérale, section 50.46 [13], qui imposent des conditions régissant l'analyse des APRP. Il conviendra de tenir compte des résultats de cet examen, lors de la vérification et révision futures des critères de sûreté relatifs aux APRP.

Globalement, les critères de sûreté relatifs aux APRP sont encore considérés comme satisfaisant pour les combustibles modernes, s'agissant de respecter les limitations fondamentales visant la possibilité de refroidissement du cœur et les rejets de matières radioactives. On estime que les résultats des essais mentionnés plus haut, parallèlement à des essais complémentaires de ductilité visant le comportement à long terme en cas d'APRP, devraient être suffisants pour vérifier les critères de sûreté en vigueur, en particulier du point de vue de l'effet du taux de combustion élevé, et pour affiner et valider la modélisation des APRP.

3.15 Dépressurisation et/ou chargements sismiques

Au cours d'un séisme, les assemblages combustibles sont soumis à des charges dynamiques structurelles qui pourraient les faire osciller, les amenant à s'entrechoquer et à percuter les parois de la cuve. Les forces de jet liées à une dépressurisation à partir d'un côté de la cuve au travers d'une canalisation rompue pourraient aussi imprimer une accélération à la cuve dans le sens latéral, entraînant des chocs analogues entre les assemblages combustibles et les parois de la cuve.

Les analyses prennent habituellement en compte les charges mécaniques et hydrauliques dans les directions horizontale et verticale ; des charges critiques d'écrasement sont utilisées afin de déterminer si de tels impacts provoquent une déformation de la grille d'espacement susceptible de réduire le débit de réfrigérant et de dégrader l'efficacité du système de refroidissement de secours du cœur. On a recours à d'autres propriétés mécaniques pour empêcher la fragmentation des barreaux de combustible qui pourrait entraîner la perte d'une configuration permettant le refroidissement, de même que la rupture de tubes-guides et des boîtiers-canaux qui pourrait faire obstacle à l'insertion des barres de commande.

La plupart des pays appliquent les critères de sûreté tels qu'ils sont énoncés dans le document NUREG-0800, SPR 4.2, Appendice A, qui exigent que la possibilité de refroidissement du cœur et d'insertion des barres de commande soit assurée en présence de l'effet combiné des charges

sismiques et des charges dues à un APRP. Ces critères se reflètent souvent dans des impératifs de conception tels que :

- il ne faut pas qu'il y ait fragmentation des barreaux de combustible (conditions qui peuvent être satisfaites en vérifiant que les contraintes appliquées aux barreaux de combustible se situent dans les limites fixées par ASME III, Appendice F) ;
- il ne faut pas faire obstacle à l'insertion des barres de commande (vérifier que les charges combinées ne déplacent pas l'assemblage combustible à partir de la structure de support, que les contraintes se situent à l'intérieur des limites susmentionnées, etc.) ;
- il faut limiter la déformation de la grille d'espacement de manière à assurer la possibilité de refroidissement des barreaux (vérifier qu'aucune déformation ni défaillance de la grille d'espacement ne se produit).

La vérification est effectuée par voie d'analyse. Comme les modèles de combustible peuvent avoir des propriétés dynamiques différentes, cette analyse peut être tributaire non seulement du modèle de combustible mais aussi du modèle de cœur ; en particulier, le cas d'un cœur hétérogène (voir également la section 5.4) doit être traité spécifiquement.

Les critères de sûreté dans ces domaines ne sont pas directement influencés par les nouveaux éléments de dimensionnement ; cependant, étant donné les vérifications analytiques qui viennent d'être mentionnées, les méthodes utilisées pour analyser les séismes et/ou APRP devraient être convenablement vérifiées et validées.

Par ailleurs, il se peut qu'il soit nécessaire de modifier les impératifs de conception visant les charges structurelles admissibles pour les séismes pendant et après un APRP à taux de combustion élevé, du fait que la résistance et la ductilité du gainage, des tubes-guides (REP) et des boîtiers-canaux (REB) à fort taux de combustion, ne seront pas les mêmes que pour des matériaux neufs. Les analyses relatives au combustible neuf révèlent habituellement des marges amples, et la résistance accrue à taux de combustion élevé amplifierait, semble-t-il, ces marges. La méthode d'examen suppose cependant que le matériau analysé est ductile, alors qu'une perte notable de ductilité se produit à taux de combustion élevé pour certains matériaux. Des modifications des propriétés des matériaux dans le cas de cœurs à fort taux de combustion et de nouveaux matériaux du cœur peuvent fort bien influencer sur les résultats de cette analyse structurelle ; ainsi, il faut un traitement approprié de ces propriétés, ce qui implique que la vérification des propriétés des matériaux à taux de combustion élevé revêt de l'importance.

3.16 Force de maintien de l'assemblage

Les assemblages combustibles des REO sont équipés de ressorts de maintien dans la pièce d'extrémité supérieure. Ils doivent permettre de disposer de forces suffisantes pour empêcher le décollage de l'assemblage combustible sous l'effet des charges hydrauliques en cours d'exploitation normale et d'incidents de fonctionnement prévus, à l'exception du transitoire de survitesse de la pompe à chaud (pour ce transitoire, un certain soulèvement est toléré ; les ressorts de maintien empêcheront à nouveau l'assemblage combustible de décoller après que le transitoire s'est atténué).

Les critères de sûreté sont habituellement définis d'après le document NUREG-0800, SPR 4.2, Appendice A : les forces de décollage vertical ne doivent pas déloger la plaque support inférieure de l'assemblage combustible de la structure de supportage du combustible.

La force de maintien requise est calculée à l'aide de la formule :

$$F_{HD} = F_{HY} + B - W$$

où

F_{HD} est la force de maintien requise
 F_{HY} est la force hydraulique
 B est la force de volume due à la flottabilité
 W est le poids de l'assemblage combustible.

La force hydraulique s'exerçant sur l'assemblage combustible dépend du débit de refroidissement et du coefficient de pertes de charge singulières de l'assemblage combustible. Une valeur prudemment élevée du débit (débit nominal mécanique) est utilisée pour calculer la force de maintien requise. Les incertitudes et tolérances sont prises en compte différemment par les fournisseurs, mais en général, il est tenu compte des incertitudes et tolérances suivantes :

- tolérance sur les distances axiales entre la plaque inférieure et la plaque supérieure du cœur du réacteur ;
- tolérance sur la longueur de l'assemblage ;
- tolérance sur le poids de l'assemblage combustible ;
- incertitude entachant le débit de refroidissement ;
- incertitude entachant le coefficient de pertes de charge singulières ;
- incertitude entachant la courbe de flèche et la caractéristique effort-flèche du ressort de maintien ;
- incertitude entachant l'expansion axiale des tubes-guides ;
- incertitude entachant la détente des ressorts.

L'évaluation analytique de la force de maintien requise est effectuée pour les conditions de démarrage à froid et pour les conditions à pleine puissance à chaud, en début et en fin de cycle.

La force de maintien de l'assemblage combustible a pour effet des forces de compression qui s'exercent sur les tubes-guides, lesquelles forces peuvent provoquer une forte courbure de l'assemblage combustible imputable au fluage des tubes-guides dû à l'irradiation. Réciproquement, des forces de compressions élevées peuvent résulter d'une expansion excessive des tubes-guides.

L'expansion des tubes-guides est liée à la fluence des neutrons rapides et donc constitue un important facteur à prendre en considération aux taux de combustion élevés, pour lesquels la forte corrosion et fixation d'hydrogène au niveau du tube guide accélèrent l'expansion de ce dernier en sus du taux dû l'irradiation par des neutrons rapides. La corrosion et la fixation d'hydrogène sont fortement tributaires de la température du réfrigérant ainsi que du matériau constituant le tube-guide et de son état. Ainsi pour faire en sorte que la corrosion et la fixation d'hydrogène au niveau du tube-guide soient acceptables, la conception et le matériau de ce dernier doivent être convenablement choisis.

En résumé les critères de sûreté ne sont pas considérés comme affectés par les nouveaux éléments de dimensionnement. En vue de la vérification analytique de ces critères, il importe de disposer de modèles suffisamment bien validés et vérifiés ; par ailleurs, on a besoin de disposer des

propriétés des matériaux, notamment à taux de combustion élevé, afin d'être à même de choisir et d'analyser convenablement ces matériaux.

3.17 Activité dans le réfrigérant

Dans la plupart des pays, le cahier des spécifications techniques de la centrale fixe les limites applicables à la concentration d' ^{131}I (parfois aussi de ^{137}Cs) dans le réfrigérant primaire ; les valeurs sont habituellement d'environ 2×10^9 Bq/t. Cela permet aux centrales nucléaires de fonctionner avec un certain nombre (restreint) de défaillances du combustible ; les circuits des centrales ont été conçus afin de prendre en charge des défaillances du combustible de cette importance. Hormis cette limitation figurant dans le cahier des spécifications techniques, il n'existe pas de critères de sûreté du combustible visant l'activité dans le réfrigérant.

Habituellement, dès que sont mesurées des concentrations supérieures d' ^{131}I qui mettrait en cause la limite du cahier des spécifications techniques, le personnel d'exploitation de la centrale prépare un arrêt de la centrale en vue de localiser et de remplacer les grappes donnant lieu à des fuites, de manière à pouvoir poursuivre l'exploitation de la centrale dans les limites définies par le cahier des spécifications techniques.

À partir d'importantes fissures dans les barreaux combustibles (contact direct entre le combustible et le réfrigérant), de la matière combustible peut être entraînée par lavage hors des pastilles, aboutissant par la suite à une concentration élevée de neptunium. Même après que le combustible donnant lieu à des fuites a été retiré, il peut falloir beaucoup de temps (plusieurs années et/ou cycles) pour que cette concentration diminue, car de la matière combustible s'est déposée dans tout le circuit primaire ; il s'ensuit que la concentration de Np ne permet pas de déceler un entraînement par lavage de faible importance à partir de défaillances ultérieures du combustible, en raison du fond de rayonnement important existant déjà. Ainsi, une pure corrélation entre la concentration effective de Np et les défaillances du combustible ne semble pas possible ; néanmoins, la plupart des fabricants de combustible associent dans leurs analyses la concentration de Np à la taille et au nombre de fuites à partir du combustible dont elle provient. Une limite future dans le cahier des spécifications techniques visant la concentration de Np peut être nécessaire afin d'éviter une exploitation avec d'importantes défaillances du combustible s'accompagnant de quantités notables de matières entraînées par lavage.

Aucune modification de la (ou des) limite(s) susmentionnée(s) n'est prévisible en liaison avec de nouveaux éléments de dimensionnement.

3.18 Activité dans l'intervalle combustible-gaine

En cours d'exploitation normale du réacteur, certains produits de fission provenant de la matrice de combustible en UO_2 se rassemblent dans l'intervalle entre la pastille de combustible et la gaine. Des valeurs fixées pour cette libération dans l'intervalle, qui peuvent atteindre 10 % de la quantité de gaz rares présente dans le barreau et 1 à 6 % de celle d'halogènes et de métaux alcalins, sont admises en hypothèse dans les analyses de sûreté. Ces activités dans l'intervalle combustible-gaine sont présumées libérées à partir de barreaux combustibles défectueux aux fins des calculs de dose hors site pour des accidents hypothétiques. Les fractions libérées admises en hypothèse ne sont pas des critères de sûreté, mais représentent des valeurs empreintes de conservatisme utilisées à des fins de conception.

Les produits de fission volatils ne sont pas très solubles dans la matrice d'UO₂, et la plupart de ces produits de fission se présentent sous la forme de bulles gazeuses qui se fixent aux joints des grains. À taux de combustion très élevé, la dimension des grains s'amenuise dans la zone du « rim », et aboutit également à la formation d'un grand nombre de micropores dans lesquels les gaz de fission sont réputés retenus ; or, ces pores ne sont pas interconnectés et ne contribuent pas notablement à la quantité de ces gaz présente dans l'intervalle combustible-gaine, car ce dernier est fermé. Cependant, les bulles gazeuses deviennent reliées les unes aux autres le long des joints au centre du combustible, offrant des cheminements plus aisés pour la libération en direction de l'intervalle. En conséquence, on constate que la libération de produits de fission dans l'intervalle augmente à fort taux de combustion ; une amplification analogue par comparaison à l'UO₂ s'observe pour le combustible MOX. Vu ces accroissements de la libération, il faut peut-être modifier les hypothèses relatives à l'activité dans l'intervalle combustible-gaine qui sont utilisées dans les analyses de sûreté.

3.19 Terme source

Pendant et immédiatement après un accident, la partie de l'inventaire de produits de fission libérée dans l'enceinte de confinement, et susceptible éventuellement d'être libérée dans l'environnement, est appelée terme source. Dans la plupart des pays, un terme source en cas d'accident grave (lié à la fusion du cœur) est défini de façon déterministe en vue d'estimer les émissions radioactives en direction du public en cas d'accident hors dimensionnement. Les valeurs du terme source sont aussi utilisées dans les évaluations probabilistes des risques (EPR) afin d'estimer les rejets des centrales et les conséquences des accidents.

Les valeurs du terme source se fondent sur des rejets mesurés à partir du combustible irradié, testés dans des conditions d'accident, en association avec des hypothèses ou des analyses relatives aux effets de rétention ou d'amplification au cours du déroulement de la séquence accidentelle.

Des valeurs du terme source relatives aux accidents de dimensionnement sont régulièrement calculées, en liaison avec des analyses de sûreté en vue de la délivrance d'autorisations relatives à de nouveaux modèles de combustible et/ou de nouvelles stratégies de chargement du cœur, afin d'évaluer les conséquences radiologiques. Ainsi, il est tenu compte de modifications dues à de nouveaux éléments de dimensionnement, qui peuvent conduire à modifier les valeurs du terme source. Cependant, les hypothèses ou les procédures d'analyse elles-mêmes ne devraient pas changer.

Il n'existe pas de critères de sûreté directement liés aux valeurs du terme source. Diverses hypothèses sont formulées en vue de l'analyse des scénarios d'accident et concernant les effets de rétention, etc. ; celles-ci reposent en partie sur les principes fondamentaux de conception des réacteurs, et peuvent varier notablement selon les divers contextes réglementaires. Bien que ces différences soient connues, les tentatives en vue d'unifier les procédures et hypothèses analytiques n'ont guère été couronnées de succès jusqu'à présent.

On estime que les nouveaux éléments de dimensionnement – notamment à taux de combustion élevé – ont les effets suivants sur les valeurs du terme source :

Les principaux effets susceptibles d'avoir une incidence sur les valeurs du terme source de même que sur la progression de la fusion du cœur à taux de combustion élevé sont :

- a) une réduction de la quantité de zirconium non oxydé dans le cœur ;
- b) la fragilisation du gainage du combustible ;

- c) une augmentation de la libération de gaz de fission à partir des pastilles de combustible en cours d'exploitation normale ;
- d) la fragmentation des pastilles de combustible ; et
- e) un durcissement du spectre des produits de fission à mesure que la fission du plutonium devient plus importante. Les effets c), d) et e) pourraient en principe aussi influencer sur les valeurs du terme source relatives au combustible MOX.

Une réduction de la quantité de zirconium métal non oxydé dans le cœur pourrait atténuer la gravité de la fusion du cœur et des phénomènes hors-cuve ultérieurs en diminuant la chaleur de réaction provenant de l'oxydation du métal. Cependant l'importance de la préoxydation du gainage sera inférieure à 15-17 % de l'épaisseur de la paroi en raison des limites réglementaires liées aux APRP et est susceptible d'être nettement inférieure à ce chiffre dans le cas des nouveaux alliages de gainage ; c'est pourquoi cet effet bénéfique serait faible. Un déplacement du combustible non fondu peut se produire en raison de la fragilisation du gainage, en particulier pour des scénarios mettant en jeu un renoyage ou une dépressurisation tardifs, mais cela ne devrait pas affecter notablement l'issue globale d'accidents de fusion continue du cœur. L'activité dans l'intervalle combustible-gaine ne comprend qu'une faible part du terme source, de sorte que des modifications même importantes de l'activité dans cet intervalle n'aurait pas un grand effet sur le terme source. Une fragmentation du combustible a été observée à fort taux de combustion, mais il semble que la dispersion des fragments se produise par lavage ou par entraînement par les gaz et il se peut qu'il n'existe pas de moyen permettant à ces matières d'atteindre l'atmosphère sous forme d'aérosols. En revanche, les émissions de particules faisant partie du terme source, sont entraînées à partir du cœur sous forme de gaz à haute température qui se condensent en aérosols. Le terme source lui-même est défini par les fractions libérées et donc ne serait pas sensible aux déplacements isotopiques. Ces déplacements seraient pris en compte dans l'analyse de la production (par exemple, à l'aide d'un programme de calcul analytique tel que ORIGEN) : en tout état de cause, les modifications devraient être faibles, cependant des programmes expérimentaux sont menés en vue d'obtenir une base adéquate permettant de valider ces programmes de calcul à taux de combustion élevés.

Compte tenu des facteurs susmentionnés, il est peu probable qu'un fort taux de combustion aura un effet notable sur le terme source ou sur la progression de la fusion du cœur. Il est possible de formuler une assertion analogue concernant le combustible MOX, en particulier eu égard à l'atténuation de la différence entre combustible MOX et combustible à l' UO_2 à mesure que le taux de combustion augmente. Il convient de noter cependant que cette conclusion se fonde sur une appréciation limitée et pourrait être modifiée par une évaluation plus approfondie. De plus, la mise en œuvre d'un terme source révisé [14] pourrait avoir une incidence sur la dépendance à l'égard des nouveaux modèles et matériaux.

4. ÉVALUATION DES MÉTHODES D'ANALYSE

Les activités de mise au point de programmes de calcul sont largement répandues, et les modèles et corrélations en jeu dans ces programmes de calcul sont nombreux en comparaison avec les critères de sûreté du combustible examinés plus haut. C'est pourquoi, le Groupe de travail ne cherchera pas à recenser tous les programmes de mise au point et les nombreux modèles et corrélations en jeu. Cependant, il est intéressant de déterminer quels modèles et corrélations seraient affectés par de nouveaux éléments en matière de dimensionnement et d'exploitation. On s'efforcera, dans cette section, de cerner les domaines laissant à désirer, à l'aide de plusieurs exemples relatifs aux travaux de mise au point en cours.

Les méthodes analytiques (programmes de calcul) sont largement utilisées dans les analyses de sûreté soit en tant de programmes indépendants, soit de façon conjointe. Ainsi, les méthodes utilisées pour l'analyse de sûreté sont centrées sur les transitoires et les accidents ; toutefois, l'analyse du régime permanent est également nécessaire pour établir les conditions initiales. Par exemple, pour l'analyse d'un APRP, il est très important d'avoir une valeur exacte de l'énergie emmagasinée dans les pastilles de combustible au moment du déclenchement de l'accident, qui peut être libérée pendant l'accident : cette énergie emmagasinée est obtenue par un calcul en régime permanent relatif à l'exploitation normale du réacteur. De plus, afin de mieux comprendre le mécanisme de défaillance en cas d'accident de réactivité, il est très important de disposer de valeurs exactes pour la teneur en gaz de fission aux joints des grains et au niveau des porosités au moment du déclenchement de l'accident, en particulier pour la zone du « rim » pour l' UO_2 et pour les amas de MOX, qui peut accélérer le gonflement du combustible et la dissociation des grains pendant l'accident ; cette teneur en gaz de fission est obtenue à partir d'un calcul en régime permanent dans des conditions normales d'exploitation.

Plusieurs types de programmes de calcul, qui sont utilisés dans l'analyse de sûreté, sont sensibles aux paramètres liés au combustible. Dans la section précédente, il a été fait état à plusieurs reprises de la nécessité de poursuivre la mise au point et la vérification des programmes de calcul ; de nouveaux éléments de dimensionnement, tels que des matériaux de gainage différents, un taux de combustion plus élevé, et l'utilisation de combustibles MOX, peuvent influencer sur les performances de ces programmes de calcul. Dans les paragraphes suivants, certains des effets les plus importants sont mentionnés afin de déterminer si ces programmes de calcul pourraient requérir un complément de vérification, voire une modification. Des exemples sont fournis au lieu de procéder à la couverture systématique de tous les modèles et effets possibles ; cela devrait être suffisant pour cerner les domaines analytiques ayant besoin d'être étudiés plus à fond.

4.1 Programmes de calcul relatifs au combustible en régime permanent

Ces programmes de calcul relatifs à des barreaux uniques, tels que FRAPCON, COMETHE, TRANSURANUS, METEOR et TOUTATIS calculent des grandeurs thermiques telles que le profil radial de température et la libération de gaz de fission dans l'intervalle combustible-gaine, et des grandeurs mécaniques telles que la déformation par fluage et l'expansion sous irradiation. Les résultats

sont utilisés à des fins multiples, par exemple, pour déterminer l'intervalle axial entre barreaux et embouts, la pression interne des gaz par comparaison avec la pression du circuit, l'épaisseur d'oxydes du gainage pour procéder à une comparaison par rapport aux limites établies ou pour entreprendre des calculs de transitoires, l'énergie emmagasinée pour l'analyse des APRP et la répartition des gaz de fission entre les grains, les joints des grains et les porosités pour les études des mécanismes de défaillance du combustible en cas d'accident de réactivité. Ces programmes de calcul se composent de nombreux modèles et corrélations visant à décrire la conductance de l'intervalle combustible-gaine, les propriétés des matériaux telles que la conductivité thermique et la chaleur spécifique, les profils radiaux de puissance, les équations contrainte-déformation, les propriétés mécaniques, les caractéristiques de fluage, le gonflement du combustible, la densification du combustible, la corrosion du côté eau, et l'absorption d'hydrogène.

Lors de travaux récents menés aux États-Unis, le programme de calcul relatif aux barreaux combustibles en régime permanent FRAPCON a été modifié [15] pour un taux de combustion atteignant 65 MWj/kg. Ce programme de calcul avait auparavant été validé jusqu'à environ 40 MWj/kg. Neuf modèles dans ce programme de calcul se sont révélés devoir être modifiés du fait que les effets du taux de combustion sur les phénomènes modélisés étaient suffisamment importants pour justifier un changement. Ces modèles visaient les aspects suivants :

- libération des gaz de fission ;
- conductivité thermique du combustible (y compris effets des adjonctions d'absorbant consommable) ;
- gonflement du combustible ;
- fissuration et déplacement des pastilles combustibles ;
- distribution radiale de la puissance ;
- conductance de l'intervalle au contact solide-solide ;
- corrosion et hydruration du gainage ;
- propriétés mécaniques du gainage et ductilité
- expansion axiale du gainage.

On s'attend à ce qu'il en aille de même pour d'autres programmes de calcul relatifs au barreau combustible à fort taux de combustion. Dans le cas de matériaux de gainage différents, les modèles liés au gainage, tels que ceux visant la corrosion, les propriétés mécaniques et l'expansion seraient concernés. De même, pour les pastilles de combustible MOX, il y a lieu de s'attendre à des modifications dans la distribution radiale de puissance, la libération de gaz de fission et la conductivité thermique, et peut-être aussi dans le gonflement, la fissuration et le déplacement (voir, par exemple, la mise au point du programme de calcul COMETHE relatif au combustible MOX à fort taux de combustion sur la base des expériences exécutées à Halden).

4.2 Programmes de calcul relatifs aux barreaux combustibles en régime transitoire

Ces programmes de calcul relatifs à des barreaux uniques, tels que FALCON/FREY, FRAPTRAN et SCANAIR permettent aussi de calculer des grandeurs thermiques et mécaniques⁴. La

4. Le programme de calcul EPRI FALCON – nouveau programme FREY – prend aussi en compte l'effet d'adhérence.

gamme des modèles et corrélations prise en compte dans ces programmes de calcul est tout à fait analogue à celle des programmes de calcul visant le régime permanent. Les principales différences entre les programmes de calcul en régime permanent et transitoire sont :

- les programmes en régime permanent ne comprennent pas dans leurs équations de résolution de termes relatifs aux transferts thermiques transitoires ; et
- les programmes de calcul en régime transitoire ne prennent pas en compte des phénomènes à long terme tels que le fluage.

Cependant, les programmes de calcul en régime transitoire doivent comporter des modèles, des corrélations et des propriétés visant le comportement de déformation plastique sous contrainte du gainage aux températures élevées, les effets du recuit, le comportement des oxydes et des hydrures pendant les rampes de température, les changements de phase et d'importantes déformations du gainage telles que le gonflement. La description mécanique du gainage est théoriquement bidimensionnelle, mais des modèles à une dimension sont également utilisés. D'autres différences entrent aussi dans les modèles telles que la libération de gaz de fission, qui peut avoir des composantes à long terme et à court terme. Les programmes de calcul en régime transitoire sont utilisés pour analyser la réponse des barreaux combustibles à des transitoires et des accidents tels que des accidents de réactivité et des APRP et peuvent inclure des modèles de défaillance.

En principe, les neuf modèles sensibles au taux de combustion élevé dans le cas des programmes de calcul relatifs au régime permanent, déterminent également les phénomènes importants qu'il faudrait modifier dans les programmes de calcul en régime transitoire. Dans certains cas, tels que celui de la libération des gaz de fission, les modèles en régime transitoire seraient fort différents de ceux en régime permanent. À des taux de combustion supérieurs à 40 à 50 MWj/kg, il convient de prêter une attention particulière à la modélisation appropriée des caractéristiques thermiques de la zone dite du « rim », étant donné la modification de sa structure et la dégradation de la conductivité thermique du combustible qui en résulte. Les phénomènes de gonflement non transitoire et d'expansion axiale peuvent ne pas être modélisés dans le programme de calcul en régime transitoire, car la durée du transitoire est trop brève pour qu'il y ait un gonflement non transitoire ou une expansion axiale notable. Des matériaux de gainage différents et des pastilles de combustible MOX peuvent avoir des effets semblables à ceux décrits pour les programmes de calcul en régime permanent.

En résumé, la nécessité d'une révision des programmes de calcul relatifs au combustible en régime transitoire se fonde sur les mêmes observations que celles applicables aux programmes de calcul relatifs au combustible en régime permanent. En particulier, pour l'analyse des transitoires rapides, la modélisation appropriée de la zone du « rim » et des amas de MOX devrait figurer dans ces efforts de révision.

4.3 Programmes de calcul de cinétique des réacteurs

Les programmes de calcul de cinétique des réacteurs, tels que RAMONA, PARCS, SIMULATE-K, CORETRAN ou SAPHYR, sont utilisés pour calculer les valeurs moyennes du flux neutronique et de la puissance des assemblages et, parfois aussi, des valeurs de crête (puissance des aiguilles) dans un cœur de réacteur au cours de phénomènes transitoires. Des phénomènes intéressant l'ensemble du cœur, tels que des modifications de la température du réfrigérant dans un REP, causent des modifications de la puissance globale qui peuvent être convenablement analysées à l'aide de modèles de cinétique ponctuels. Dans les REB, des transitoires analogues exigent le recours à des

modèles de cinétique unidimensionnels en raison des importantes modifications axiales de la distribution de puissance. Cependant, des événements localisés tels que l'éjection d'une grappe dans un REP, la chute des barres de commande ou des oscillations régionales de puissance dans un REB, exigent une analyse multidimensionnelle de la cinétique des neutrons. Pour des modèles de cinétique ponctuels, on a besoin comme données d'entrée des coefficients de réactivité, de la fraction efficace de neutrons retardés, du temps de génération et des valeurs de réactivité des barres de commande. Pour les modèles de cinétique uni- et tridimensionnels, il faut des paramètres d'entrée neutroniques tels que les sections efficaces neutroniques moyennes des assemblages (habituellement condensées en deux groupes d'énergie), des fractions de neutrons retardés (habituellement sur une base nodale) qui sont obtenus à partir de programmes de calcul de statique des réacteurs.

Des programmes de calcul nodal modernes (de statique) utilisant deux groupes d'énergie sont mieux à même de traiter les forts gradients de flux qui apparaissent lorsqu'un assemblage contenant du combustible MOX est placé à côté d'un assemblage en UO₂. Cette technique est aussi utilisée pour les programmes de calcul en régime transitoire. Dans le cas de conditions d'accident, par exemple d'accident de réactivité, on admet en hypothèse que davantage de groupes d'énergie des neutrons peuvent être nécessaires pour prendre en charge le spectre neutronique plus dur résultant de la fraction croissante de plutonium dans le combustible (cela aurait pour conséquence d'aboutir aussi à un formalisme multigroupe dans le cas des programmes de calcul de statique des réacteurs).

La réduction de la fraction de neutrons retardés et le nombre de neutrons libérés par absorption dans le combustible seront traités par le programme de calcul du taux de combustion de l'assemblage et automatiquement intégrés en conséquence dans les ensembles de sections efficaces en cas de transitoire.

Les modèles relatifs au combustible utilisés dans ces programmes de calcul ne sont normalement pas très détaillés ; des extensions de ces modèles pourraient être envisagées (couvrant par exemple, la conductivité thermique) à en vue d'une meilleure modélisation du combustible à taux de combustion élevé.

4.4 Programme de calcul de statique des réacteurs

Les programmes de calcul de statique des réacteurs (programmes relatifs au taux de combustion des assemblages combustibles) sont utilisés afin de générer les sections efficaces neutroniques en usage dans les programmes de calcul de cinétique multidimensionnels en fonction du taux de combustion, d'autres paramètres relatifs à l'évolution dans le temps et des paramètres thermohydrauliques instantanés tels que la température du combustible et la température de la masse volumique du modérateur.

Les simulateurs tridimensionnels (de la statique) du cœur sont aussi alimentés à l'aide de ces données en vue des calculs relatifs au cœur. On détermine à l'aide de ces programmes de calcul les distributions de puissance, la valeur de réactivité correspondant aux distributions du taux de combustion et les coefficients de réactivité pour l'ensemble du cœur. Des sections efficaces unidimensionnelles sont générées à partir des répartitions du flux en régime stationnaire à l'aide de programmes de réduction auxiliaires.

Ces résultats sont utilisés pour sélectionner les propriétés thermiques appropriées en fonction du taux de combustion dans les programmes de calcul en régime transitoire telles que la conductivité thermique. La prévision précise du taux de combustion est donc un aspect important des programmes de calcul de statique des réacteurs (la prévision appropriée de la composition isotopique du

combustible pour un taux de combustion donné est aussi importante pour une prévision exacte de la chaleur résiduelle).

Présentement, des programmes de calcul de statique modernes ont été appliqués avec succès en vue de l'analyse de cœurs dont une partie du chargement est constituée de combustible MOX. Comme aucun « aspect nouveau » de physique des réacteurs n'est attendu à taux de combustion élevé, une extension de la base de validation de ces programmes de calcul à des taux de combustion plus élevés – spécialement en vue d'améliorer la qualité de la prévision de la composition isotopique du combustible irradié – semble être la seule question revêtant de l'importance en l'occurrence (des données pour l'exécution de calculs repères étant fournies par des programmes expérimentaux).

4.5 Programmes de calcul de thermohydraulique

De grands programmes de calcul relatifs aux systèmes de réacteurs tels que TRAC, RELAP, CATHARE, ATHLET et RETRAN sont utilisés pour calculer le débit, la température et la pression en cours d'exploitation normale et de transitoires. Ces programmes de calcul comportent habituellement des modèles de cinétique ponctuels, afin de modéliser la puissance du réacteur dans le cas des REP, et la cinétique unidimensionnelle dans le cas des REB, de même que des modèles unidimensionnels simples de barreaux combustibles. Ils peuvent, dans certains cas, être couplés à des programmes de calcul tridimensionnels de cinétique des neutrons, voire à des programmes de calcul plus détaillés relatifs aux barreaux combustibles. D'une façon générale, les programmes de calcul de thermohydraulique comportent au minimum au moins un canal de refroidissement qui représente quelques barreaux combustibles séparés, habituellement un barreau moyen et un barreau chaud. Les modèles relatifs aux barreaux combustibles dans les programmes de calcul de thermohydraulique comporteront habituellement des corrélations de transfert thermique (du gainage au réfrigérant), une valeur constante ou variable (modèle dynamique d'intervalle entre combustible et gaine) pour la conductance de l'intervalle, et des valeurs moyennes pour la conductivité thermique et la capacité calorifique. Pour l'analyse des APRP, ces programmes de calcul comportent généralement des modèles de gonflement, de rupture et d'oxydation.

Bien qu'ils soient plus simples dans la pratique, les modèles relatifs au combustible dans les programmes de calcul de thermohydraulique décrivent les mêmes phénomènes fondamentaux que ceux utilisés dans les programmes de calcul relatifs aux barreaux combustibles en régime transitoire, et seraient ainsi influencés de manière analogue par des taux de combustion élevés, des modifications apportées aux matériaux de gainage, et la présence de pastilles de combustible MOX. On estime qu'un choix approprié de propriétés thermiques à la fois des pastilles de combustible et du gainage pour le barreau moyen et le barreau chaud (principalement dépendance à l'égard du taux de combustion) revêt une grande importance. En général, ces modèles simplifiés sont testés à l'aide calculs repères de comparaison avec les modèles détaillés relatifs aux barreaux combustibles en régime transitoire.

On estime qu'il n'existe pas de nécessité manifeste de réviser ce type de grands programmes de calcul relatifs aux systèmes de réacteurs en raison de nouveaux éléments de dimensionnement, cependant les modèles de gonflement et de rupture peuvent être affinés à l'avenir.

4.6 Programmes de calcul de sous-canaux

Cette catégorie de programmes de calcul est utilisée pour analyser la répartition du débit à l'intérieur d'un assemblage combustible. Normalement, elle comporte un modèle tridimensionnel relatif à l'écoulement diphasique, des modèles unidimensionnels des différents barreaux combustibles

et des modèles détaillés relatifs au transfert thermique entre la surface du gainage et le réfrigérant. Des modèles permettant le calcul du flux thermique critique en font partie. Ce type de programme de calcul est utilisé pour démontrer la conformité aux prescriptions en matière de rapport d'échauffement critique et/ou rapport de puissance critique.

Les grappes de combustible de conception moderne comportant des barreaux courts et de grands canaux remplis d'eau représentent de nouveaux problèmes à résoudre pour les programmes de calcul de sous-canaux. Afin de pouvoir prévoir convenablement la distribution du taux de vide à l'intérieur de la grappe, en particulier à proximité des canaux remplis d'eau non chauffés, il peut être nécessaire d'améliorer la modélisation de la dérive dite latérale des vides.

La marge au rapport de puissance critique et/ou à l'échauffement critique est déterminée à l'aide de corrélations propres à chaque modèle de combustible ; ainsi, de nouveaux modèles de combustible s'accompagnent de révisions des corrélations du rapport de puissance critique / rapport d'échauffement critique (voir aussi section 3.1). Ces corrélations ont des formulations propres au modèle de combustible, dans lesquelles la dépendance à l'égard du taux de combustion n'est normalement pas prise en considération. Le rapport de puissance critique et/ou l'échauffement critique est déterminé sur la base de valeurs moyennes des paramètres pour le canal. En l'occurrence, seules les conditions à la surface du gainage semblent dépendre du taux de combustion ou d'autres nouveaux éléments de dimensionnement.

Il est admis en hypothèse qu'une surface du gainage fortement oxydée pourrait avoir des caractéristiques de caléfaction différentes de celles d'une surface neuve ; ainsi, une certaine influence mineure sur le flux thermique critique ne peut pas être exclue. On ne dispose pas actuellement de données fiables sur cet effet possible.

En résumé, il existe un besoin de réviser les programmes de calcul relatifs aux sous-canaux dans le domaine de la représentation géométrique des grappes de combustible modernes et de la modélisation de la distribution du taux de vide.

4.7 Programmes de calcul pour l'analyse structurelle du cœur du réacteur

Des programmes de calcul tels que ANSYS et ABACUS sont utilisés pour modéliser la réponse linéaire et non linéaire des composants de l'assemblage combustible et du cœur, par exemple au cours des accélérations imprimées à la cuve par des séismes et par la dépressurisation asymétrique à la suite d'une rupture de canalisation lors d'un APRP. Des analyses d'élasticité sont habituellement exécutées et les chargements ou contraintes calculés sont comparés aux valeurs admissibles fixées par l'ASME.

L'irradiation et l'oxydation altèrent la résistance des matériaux du cœur à mesure que le taux de combustion augmente, et ces modifications des propriétés des matériaux peuvent être utilisées comme données d'entrée dans les programmes de calcul pour l'analyse structurelle. Toutefois, les programmes de calcul, qui sont utilisés à cet effet, admettent habituellement en hypothèse que le matériau est ductile de sorte qu'une déformation plastique se produirait au-delà de la limite d'élasticité. Cela figure dans les facteurs de sûreté intégrés dans les analyses. Il est permis de douter de la validité de cette méthode analytique pour certains matériaux du cœur qui perdent leur ductilité et deviennent fragiles à taux de combustion élevé.

5. SUJETS SPÉCIAUX

Dans le cadre de l'évaluation des critères de sûreté, les membres du Groupe de travail se sont penchés sur diverses questions en rapport avec un ou plusieurs critères, qui sont devenues particulièrement intéressantes. Ces questions font l'objet ci-après d'un examen distinct.

5.1 Taux de combustion élevé

En premier lieu, on trouvera un bref résumé de la situation concernant la question du taux de combustion élevé (limites autorisées de combustion massique, niveaux de combustion massique atteints présentement et extensions escomptées du taux de combustion).

Les limites autorisées de combustion massique dépendent du type de combustible et du fournisseur de combustible ; les limites autorisées peuvent se rapporter à des niveaux locaux du taux de combustion (parfois qualifié de taux de combustion de la « pastille la plus chaude ») et/ou aux niveaux moyens du taux de combustion des barreaux et/ou aux niveaux moyens des taux de combustion des assemblages. Les limites autorisées suivantes du taux de combustion sont indiquées à titre d'exemples :

- un taux de combustion moyen maximal par barreau de 62 MWj/kg pour certains combustibles aux États-Unis ;
- une limite générique pour le taux de combustion moyen maximal par barreau de 48 MWj/kg en Finlande ;
- une limite générique pour le taux de combustion moyen par assemblage de 52 MWj/kg en France (récemment porté à ce chiffre, alors qu'il était de 47 MWj/kg) pour le combustible à l' UO_2 (actuellement, le combustible MOX est encore limité à 3 cycles d'insertion d'un an) ;
- une limite générique pour le taux de combustion moyen par assemblage de 40 MWj/kg en Finlande ;
- des limites génériques pour le taux de combustion moyen par assemblage de 48 MWj/kg pour les REP et de 50 MWj/kg pour les REB au Japon ;
- des taux moyens maximaux par assemblage de 65 MWj/kg pour les REP et de 53 MWj/kg pour les REB, dans le cas de certains combustibles en Allemagne ;
- des taux de combustion moyens maximaux par assemblage de 48 à 60 MWj/kg ou des taux locaux maximaux de 65 à 70 MWj/kg, pour divers combustibles différents en Suisse.

Il est probable que la tendance générale à accroître les niveaux du taux de combustion se poursuivra au cours des prochaines années. Aux États-Unis, des niveaux moyens du taux de combustion par barreau de 62 MWj/kg ont été atteints et des demandes visant à porter à environ

75 MWj/kg le taux de combustion moyen du barreau « le plus chaud » ont été examinées au sein de la NRC. En France, au Japon et en Allemagne, les compagnies d'électricité cherchent à accroître le taux de combustion moyen maximal par assemblage en le portant de 42-50 MWj/kg à 52-55 MWj/kg, avec une valeur correspondante du taux de combustion moyen de la pastille la plus chaude atteignant 65 MWj/kg au cours des quelques prochaines années. En Suisse, on a déjà atteint un taux de combustion moyen de la pastille la plus chaude de 65 MWj/kg. Toutes ces valeurs s'écartent notablement du niveau du taux de combustion de 40 MWj/kg initialement escompté au cours de la mise au point des critères.

Dans la section 3, la question du taux de combustion élevée et ses conséquences possibles ont été évoquées à plusieurs reprises. L'industrie se focalise fortement sur le taux de combustion, dont elle prétend qu'il constitue la clé principale d'une meilleure économie du combustible ; en conséquence, cette question continue de bénéficier d'une attention soutenue, en ce qui concerne spécialement le comportement en cas de transitoire et/ou d'accident [16].

Ces dernières années, davantage d'informations sont devenues disponibles concernant le comportement du combustible fortement irradié. Cela a permis de disposer d'une base supplémentaire pour l'exploitation du combustible et/ou du cœur à un niveau du taux de combustion atteignant ceux actuellement autorisés. Cependant, le Groupe de travail considère également qu'il faut poursuivre les recherches afin :

- de vérifier expérimentalement la validité des critères de sûreté à taux de combustion élevé, en particulier aux niveaux dépassant ceux actuellement autorisés ; et
- d'améliorer et de valider à l'aide de calculs repères les modèles analytiques utilisés pour définir et surveiller les critères de sûreté à taux de combustion élevé.

Cet aspect est particulièrement important, car l'incitation économique à accroître le taux de combustion du combustible prévaut encore ; des études sont déjà entreprises par l'industrie en vue d'essayer de porter le taux de combustion du combustible au niveau de 100 MWj/kg.

Quant aux programmes de recherche, le Groupe de travail encourage tout particulièrement les programmes d'essai exécutés à Halden [1], à l'ANL [13], dans le réacteur NSRR [17] de même que les programmes français [11,12] qui, espère-t-on, fourniront des informations supplémentaires concernant le comportement du combustible à fort taux de combustion en cas d'APRP ou d'accident de réactivité. Par ailleurs, l'extension du programme d'essai CABRI, comportant des essais dans une boucle à eau de REP, qu'il est prévu de construire au cours des prochaines années, devrait contribuer à la mise au point de limites plus réalistes en cas d'accident de réactivité [18].

D'une façon générale, comme cela a été indiqué tout au long de ce rapport, il importe que tous les aspects liés au taux de combustion élevé soient convenablement couverts (conception du combustible et du cœur, choix de matériaux, validité des méthodes d'analyse). À cet égard, les fournisseurs de combustible assumeront l'essentiel de la responsabilité de la qualification fondamentale de leurs combustibles respectifs ; une vérification indépendante par les compagnies d'électricité (revêtant probablement la forme d'un effort conjoint, par l'intermédiaire de programmes de R-D patronnés au plan international et menés dans des centres de recherche nationaux ou internationaux) devra être ajoutée, tout en choisissant convenablement et avec soin les hypothèses d'essai pour les expériences.

5.2 Gestion du cœur

Les coûts du cycle du combustible représentent une part importante du coût de l'exploitation des centrales. Les stratégies des compagnies d'électricité en vue de réduire ces coûts ont intensifié l'activité dans le domaine de la gestion du cœur ; par suite d'une gestion optimisée du cœur, par exemple de taux de combustion du combustible plus élevés au déchargement, les stratégies en matière de chargement ont changé.

Il y a environ 15 à 20 ans, la stratégie de chargement consistait à charger le combustible frais au centre du cœur, puis en fonction de l'irradiation, à déplacer le combustible en direction du bord du cœur à chaque rechargement (mode de chargement dit à faibles fuites, ou « de l'intérieur vers l'extérieur »). Pour ce type de stratégie de chargement, les courbes d'évolution de la puissance thermique linéique ont accusé une baisse régulière en fonction du taux de combustion du combustible.

Les stratégies modernes de chargement, comportant une quantité plus faible de grappes neuves de rechargement en raison de l'irradiation plus élevée du combustible au déchargement, conduiront à recharger un nombre plus faible de grappes neuves, ce qui entraînera des pics de puissance plus élevés en raison de la réactivité plus forte des grappes de combustible frais. Les critères de sûreté, notamment la puissance thermique linéique, la marge d'arrêt et l'échauffement critique et/ou le rapport de puissance critique, doivent toutefois encore être respectés ; il s'ensuit que des grappes de combustible à taux de combustion très élevé peuvent maintenant devoir être chargées au centre de cœur en position contiguë avec des grappes de combustible frais. Cela implique que le fait d'atteindre les niveaux maximaux du taux de combustion ne se limite plus aux grappes situées à la périphérie du cœur. Par ailleurs, d'autres caractéristiques d'une gestion moderne du cœur, telles que le modèle de cycle de cœur à cellule de commande pour REB (déplacement de quelques barreaux choisis seulement pour la commande de la réactivité au cours du cycle) conduisent à placer le combustible à fort taux de combustion au centre du cœur.

Cette situation peut influencer sur le comportement du combustible à fort taux de combustion au cours de transitoires et/ou d'accidents. À titre d'exemple, au cours d'un APRP de faible à moyenne importance, le gainage du combustible neuf peut s'affaïsser en raison de la faible pression interne⁵ de la gaine, et le combustible à fort taux de combustion peut se gonfler du fait de la libération des gaz de fission en cours d'exploitation normale avant le transitoire et au cours du transitoire proprement dit. Dans le cas de l'affaïssement de la gaine, une forte interaction mécanique entre la pastille de combustible et le gainage l'emporte sur l'oxydation interne du gainage, et conjointement avec la diffusion du matériau de la pastille et des gaz de fission dans le gainage, entraînera la défaillance du combustible ; dans du combustible à fort taux de combustion, les mécanismes prédominants sont le gonflement de la gaine, sa rupture et son oxydation sur les deux faces par la vapeur. De plus, au cours de la trempe et du refroidissement du combustible, les mécanismes de défaillance sont différents selon qu'il s'agit de grappes de combustible à fort taux de combustion ou neuf. L'effet des mécanismes de défaillance du combustible dans le cas du combustible à fort taux de combustion peut être amplifié par le niveau plus élevé de réactivité (puissance) dans le combustible neuf contigu ; en contrepartie, les effets dans le combustible à fort taux de combustion pourraient exercer une influence défavorable sur les mécanismes de défaillance dans le combustible neuf. Par ailleurs, le comportement différent des grappes de combustible neuf et à fort taux de combustion a une incidence sur la redistribution de l'écoulement au cours de l'accident, ce qui peut remettre en cause le critère de la possibilité de refroidissement du combustible.

5. Ce qui n'arrivera pas dans le cas d'un APRP correspondant à une grande brèche, du fait de la baisse rapide de la pression du réfrigérant : il se produit même une surpression interne pour du combustible frais.

Les exemples ci-dessus permettent de mettre en lumière l'importance de disposer de bons modèles de physique convenablement vérifiés et/ou testés par des calculs repères.

Habituellement, les programmes de calcul utilisés dans l'analyse des transitoires et accidents sont unidimensionnels. Actuellement, la modélisation la plus moderne comporte le recours à des programmes de calcul tridimensionnels de cinétique des neutrons, bien que la modélisation thermo-hydraulique demeure unidimensionnelle. Les cœurs des réacteurs devenant plus hétérogènes, la capacité des programmes actuels d'analyser le comportement des grappes de combustible à fort taux de combustion et neuf en cas de transitoire, devrait être vérifiée. Il importe tout autant de poursuivre la mise au point de programmes de calcul, qui soient capable d'analyser des phénomènes thermo-hydrauliques complexes entre des grappes de combustible contiguës, tels que les écoulements transversaux entre parties affaissées et gonflées du combustible provoqués par l'obstruction. Il importe que cette vérification comprenne des données expérimentales concernant ces phénomènes.

En résumé, des modifications dans la gestion du cœur ne bouleversent pas directement les limites ou marges de sûreté ; tant que l'on dispose d'une modélisation satisfaisante pour décrire les phénomènes se produisant dans les cœurs actuellement conçus et exploités, les limites de sûreté ne sont pas touchées.

5.3 Combustible MOX

Dans le passé, le retraitement a paru constituer une option viable dans certains pays, Ainsi, des contrats ont été passés avec des sociétés de retraitement, aboutissant à la production d'une certaine quantité de Pu fissile, qui peut être utilisé conjointement avec de l' UO_2 pour la fabrication du combustible dit à mélange d'oxydes (MOX), de même qu'à une certaine quantité d'uranium retraité qui peut être utilisé comme matrice ou mélangé à de l' UO_2 ordinaire. Par ailleurs, au cours de ces dernières années, l'option consistant à utiliser de l'uranium hautement enrichi ou du plutonium de qualité armement a déclenché des activités aux États-Unis, par exemple.

Ainsi, on procède (à ce jour surtout en Europe) ou l'on projette de procéder à l'introduction de combustible MOX dans un certain nombre de pays, ce qui est par conséquent un sujet de préoccupation en ce qui concerne les critères de sûreté. Divers modèles ont été et sont envisagés : présentement, le type de modèle « tout MOX » comportant la plus forte quantité possible de Pu dans le nombre le plus réduit possible d'assemblages semble être la solution la plus intéressante du point de vue économique (l'absorbeur consommable n'étant encore mélangé qu'à l' UO_2). En général, les performances du combustible MOX sont moins bien caractérisées que celles du combustible à l' UO_2 , en particulier à fort taux de combustion. Des expériences continueront d'être nécessaires afin de confirmer les régimes d'exploitation dans lesquels les combustibles MOX sont conformes aux critères de sûreté, compte tenu aussi du fait que les performances du combustible MOX peuvent être modifiées par le procédé de fabrication et par la teneur totale en plutonium du combustible (et le rapport $Pu_{\text{fissile}}/Pu_{\text{total}}$).

Les effets liés à la sûreté de l'insertion de combustible MOX (par comparaison au combustible standard à l' UO_2) peuvent se résumer comme suit :

- en général, il faut s'attendre à une moindre efficacité du bore et des barres de commande en raison de caractéristiques isotopiques et spectrales différentes ;
- pour la même raison, on observe en général un coefficient Doppler et de température du modérateur plus négatif ;

- les caractéristiques de la chaleur résiduelle sont légèrement différentes (effets plus faibles à court terme, mais plus importants à long terme).

Cela entraîne en puissance une marge d'arrêt inférieure et une réaction plus rapide aux transitoires ; du point de vue radiologique, la réaction différente en matière de chaleur résiduelle compensera la réaction face à l'accident, mais aggravera le comportement à long terme (s'agissant du stockage, par exemple).

Ces effets sont principalement contrebalancé par la conception du combustible et du cœur, s'apparentant à l'introduction de nouveaux types de combustible. En particulier, la conception et l'analyse de sûreté qui s'ensuit, tiennent compte des caractéristiques spécifiques du combustible MOX, et garantissent que les limites de sûreté en vigueur sont respectées. Les résultats de l'analyse de transitoires et/ou d'accidents dont il est fait état [19], n'indiquent que des différences mineures entre les cœurs d'UO₂ et de MOX de conception acceptable, tant que la quantité de combustible MOX demeure inférieure à 50 % du chargement total du cœur. Dans certains cas les compagnies d'électricité peuvent avoir procédé à des modifications de la centrale telles qu'un accroissement de la concentration de bore (en augmentant le contenu de bore du réservoir d'injection, la capacité du réservoir ou le niveau d'enrichissement en bore).

On a rencontré des difficultés de modélisation en liaison avec l'insertion de combustible MOX, par exemple des différences plus importantes que celles normales entre les valeurs calculées et les signaux mesurés des détecteurs dans des cœurs comportant du combustible MOX indiquent que la précision de la modélisation des méthodes en régime permanent n'est peut être pas aussi bonne que dans les cœurs à combustible UO₂. Dans certains cas, la modélisation a été ou est en cours d'amélioration ; la vérification et la validation de la modélisation de la physique du combustible MOX demeure une question importante qui est étroitement liée à la question de l'analyse des incertitudes.

Bien que l'hypothèse selon laquelle les critères de sûreté du combustible UO₂ et MOX sont identiques, semble généralement admise, il subsiste certaines questions visant un comportement éventuellement différent du combustible MOX, en particulier à taux de combustion élevé. Les caractéristiques isotopique et la structure des pastilles (grains) différentes du combustible MOX peuvent aboutir à des différences dans les caractéristiques de libération des gaz de fission, par exemple, et influencer ainsi indirectement sur des critères tels que ceux relatifs aux accidents de réactivité (par exemple, l'essai CABRI-REP-Na7 visant du combustible MOX à un taux de combustion de 55 GWj/t, avec une corrosion de la gaine de 50µm, a abouti à une dispersion du combustible et à une interaction intense combustible-réfrigérant à 120 cal/g, alors que les essais CABRI-REP-Na3 sur du combustible UO₂ à un taux de combustion de 53 GWj/t, avec une corrosion de la gaine de 40µm, n'ont pas entraîné de défaillance malgré une largeur d'impulsion inférieure à 120 cal/g [18]). La révision des divers critères devrait donc inclure le combustible MOX, lorsqu'il y a lieu.

5.4 Cœurs hétérogènes

Avec l'introduction de nouveaux types de combustible (modèles avancés, MOX, etc.) un « cœur hétérogène », autrement dit un cœur composé de plus d'un modèle particulier, se présentera inévitablement. La conception du combustible et du cœur doit garantir que le combustible nouvellement introduit est compatible avec le combustible en place du point de vue de la physique et de la thermohydraulique ; les limites de sûreté applicables au combustible et au cœur sont pour l'essentiel inchangées, mais peuvent devoir être adaptées à la situation d'un cœur hétérogène.

Chaque type de combustible s'accompagne d'un ensemble de critères de sûreté spécifiques, tels que la puissance thermique linéique, l'oxydation ou l'interaction pastille-gaine. Ces limites sont établies par le fournisseur du combustible en cause, et doivent être respectées qu'il s'agisse ou non d'un cœur hétérogène. D'autres limites, telles que le rapport de puissance critique ou la marge d'arrêt correspondant à la limite de sûreté, qui ont trait à l'ensemble du cœur, doivent être analysées par l'ingénieur chargé de l'analyse de sûreté (habituellement chez le fournisseur du combustible).

Ainsi, la situation du cœur hétérogène est fondamentalement couverte par l'analyse de sûreté qu'exécute les fournisseurs responsables de la conception du combustible et du cœur. Si les compagnies d'électricité ne changent pas de fournisseur de combustible, les diverses analyses présentent une cohérence interne ; dès lors que les méthodes de conception et de surveillance du fournisseur sont approuvées, aucune action supplémentaire n'est requise.

Si toutefois plus d'un fournisseur de combustible est en cause, la compagnie d'électricité doit prendre des mesures appropriées afin de faire en sorte que les méthodes et corrélations différentes n'entraînent pas d'incohérences ou de déséquilibres. En particulier, la surveillance du cœur (pendant l'exploitation de la centrale) doit être prise en compte sur ce point : à titre d'exemple, les signaux des détecteurs à l'intérieur du cœur sont fondés sur le flux neutronique provenant de grappes de divers types différents de combustible, et les modèles doivent être ajustés pour révéler correctement chacun des flux ou, si le signal global se répartit uniformément sur l'ensemble des grappes, une dérive systématique appropriée doit être introduite pour les grappes qui produisent un flux plus élevé.

La situation d'un cœur hétérogène est ainsi fondamentalement couverte par une conception et une analyse appropriées, qui devrait englober les domaines suivants :

- compatibilité du point de vue de la neutronique et de la thermohydraulique, par exemple : niveau local et global de la réactivité, caractéristiques du débit dans la grappe (par exemple, risque de non-irrigation dans les grappes avoisinantes du fait d'une faible perte de charge pour les REB, ou variations axiales de débit due à des redistributions locales du débit pour les REP) ;
- mise au point de limites de sûreté applicables tant à chaque type particulier de combustible qu'au cœur hétérogène ;
- analyse de sûreté (de type rapport final de sûreté) dans laquelle les caractéristiques et les incompatibilités des cœurs hétérogènes sont prises en considération comme il convient.

Il peut y avoir une influence sur la fixation des limites de sûreté du fait des caractéristiques propres aux cœurs hétérogènes ; cette influence est comparable aux différences dans la fixation de limites imputables aux caractéristiques propres au cycle et ne constitue pas en elle-même une modification fondamentale dans les critères de sûreté. L'influence sur les critères de sûreté due aux caractéristiques propres au type de combustible, correspondant aux modifications apportées à la conception et aux matériaux, est déjà examinée séparément (voir l'analyse figurant à la Section 3).

Lorsque l'on procède à la vérification et à la validation des modèles de physique et/ou de thermohydraulique, les caractéristiques des cœurs hétérogènes devraient être prises en considération. Les données qui ne peuvent pas être partagées entre fournisseurs de combustible sont un sujet particulièrement préoccupant ; en l'occurrence, il est nécessaire de passer des arrangements spéciaux garantissant une fixation prudente et un suivi des limites de sûreté.

5.5 Descente incomplète des barres de commande

Ces dernières années, on a observé un arrêt d'urgence par dysfonctionnement des barres dans plusieurs REP (en Europe et aux États-Unis), imputable à une descente incomplète des barres de commande. La modification de la réactivité lors d'un arrêt d'urgence peut influencer sur le respect de la marge d'arrêt prescrite, de même que sur la réaction générale au transitoire et/ou à l'accident.

À titre de mesure temporaire, l'effet de la modification de la réactivité lors d'un arrêt d'urgence sur la marge d'arrêt et la réaction au transitoire, sur la base du comportement observé en matière de descente incomplète de barre de commande, est pris en compte pour l'analyse de sûreté et la conception du cœur ; la conception propre au cycle et l'analyse de la sûreté au rechargement sont adaptées lorsqu'il y a lieu.

Des analyses des causes profondes ont montré que les propriétés mécaniques de l'assemblage combustible et/ou de la grappe de barres de commande sont responsables de la descente incomplète des barres de commande ; l'ajustement et/ou l'amélioration de la conception mécanique devraient permettre de résoudre définitivement ce problème.

Les critères de sûreté eux-mêmes sont donc considérés comme n'étant pas affectés par la descente incomplète des barres de commande.

5.6 Anomalie du déséquilibre axial de puissance

Lorsque se produit une accumulation notable d'impuretés dans la partie supérieure d'un cœur de REP, en particulier dans des assemblages à puissance élevée, les taux de fission sont réduits du fait de l'absorption de métaborate de lithium (LiBO_2) dans la couche d'impuretés. En conséquence, la distribution de puissance se déplace vers l'extrémité inférieure du cœur, provoquant une réduction de la marge d'arrêt et une augmentation de la pointe de puissance locale. En cours d'exploitation, on observe une anomalie de la distribution de puissance avec une pointe à l'extrémité inférieure ; au cas où le déplacement de la puissance persisterait, les effets de la combustion massive finiront par inverser le déplacement de la puissance, déclenchant une distribution de puissance avec une pointe à l'extrémité supérieure vers la fin du cycle. La distribution de puissance avec une pointe à l'extrémité inférieure aura tendance à réduire la marge d'arrêt, provoquant de ce fait des déviations dans la position critique estimée des barres de commande, et aussi à accroître la pointe de puissance locale.

Ce phénomène, appelé anomalie du déséquilibre axial de puissance, a été observé surtout dans des cœurs à haute énergie de plusieurs REP aux États-Unis [20]. Les réductions de puissance opérées dans l'espoir de libérer le métaborate de lithium à partir des impuretés se sont avérées très peu efficaces ; les compagnies d'électricité pourraient toutefois continuer d'exploiter les centrales dans les limites des prescriptions de base en vigueur pour les autorisations, en réduisant la puissance et/ou en introduisant des restrictions en matière de fonctionnement. Ultérieurement, lorsqu'on a déterminé que l'importance de l'ébullition sous-saturée à la surface des barreaux combustibles dans la partie supérieure du cœur constituait la principale condition pour qu'il y ait une anomalie du déséquilibre axial de puissance, des méthodes permettant d'évaluer et de limiter l'ébullition nucléée ont été mises en œuvre dans le cas des cœurs à haute énergie ; depuis lors, peu d'incidents mettant en jeu une anomalie du déséquilibre axial de puissance ont été signalés.

Les compagnies d'électricité et les fournisseurs poursuivent encore leurs études de ce phénomène. Un groupe d'experts de l'industrie, patronné par l'Institut de recherches sur l'énergie électrique [*Electric Power Research Institute – EPRI*] a été chargé de se pencher sur cette question et

de formuler des recommandations visant la conduite de l'exploitation en cas d'anomalie du déséquilibre axial de puissance.

Sans chercher à formuler des recommandations sur ce sujet, le Groupe de travail reconnaît qu'il peut être assez difficile de trouver des parades à l'anomalie du déséquilibre axial de puissance au cours d'un cycle d'exploitation, et il s'ensuit que l'exploitant peut ne pas avoir d'autre choix que d'exécuter des évaluations de la sûreté dès qu'une telle anomalie est observée, afin de confirmer la validité des prescriptions de base en vigueur pour les autorisations et de prévoir l'évolution possible de la marge d'arrêt et des facteurs de forme. L'importance de l'ébullition nucléée peut en fait être déterminée à l'avance à partir des analyses de dimensionnement du rechargement, et en conséquence il peut y avoir une possibilité de maîtriser par le dimensionnement l'effet de l'anomalie du déséquilibre axial de puissance. Dans certaines centrales, l'élimination des dépôts massifs d'impuretés à l'aide de méthodes avancées par ultrasons a été employée avec succès [21].

L'anomalie du déséquilibre axial de puissance ne devrait pas affecter directement l'un quelconque des critères de sûreté du combustible. Les valeurs effectives de certains critères de sûreté, notamment la marge d'arrêt, peuvent changer pour certaines des centrales affectées (celles équipées de REP à cœur à haute énergie).

6. PROGRAMMES D'ESSAIS

Dans cette section, on trouvera quelques exemples de programmes de recherche qui contribuent à l'étude des phénomènes et mécanismes afférents au comportement du combustible dans des conditions de transitoires et/ou d'accidents.

6.1 Programme d'essai de l'ANL

Du fait que l'issue d'un APRP est fortement tributaire de l'obstruction de l'écoulement et de la fragilisation du gainage, les importants effets de corrosion, les taux d'oxydation accrus, et la ductilité réduite du gainage, qui s'observent à taux de combustion élevé, sont susceptibles d'avoir une incidence notable.

Outre les critères réglementaires, des programmes de calcul du comportement du combustible sont utilisés pour mieux comprendre les résultats expérimentaux et pour exécuter des analyses de sûreté. Des programmes, tels que le programme FRAPCON de la NRC, ont été actualisés en ce qui concerne les effets des taux de combustion élevés pour autant que cela ait été possible. Ces actualisations des programmes de calcul se sont pour une large part cantonnées aux propriétés thermiques des pastilles de combustible (conductivité thermique, libération de gaz de fission, etc.) car les propriétés mécaniques du gainage n'ont pas encore été mesurées à de forts taux de combustion – en particulier dans les conditions transitoires requises.

Un programme d'essai exécuté au Laboratoire national d'Argonne [Argonne National Laboratory – ANL] sous l'égide de la NRC avec la coopération de l'EPRI, a deux objectifs principaux :

- déterminer le comportement du combustible à fort taux de combustion dans des conditions simulées d'APRP ; et
- établir une base de données sur les propriétés mécaniques du gainage à fort taux de combustion dont on a besoin pour analyser les transitoires qui revêtent de l'importance dans les analyses de sûreté liées aux procédures d'autorisation.

Il existe deux objectifs subsidiaires de nature pratique :

1. établir une méthode analytique ou empirique permettant d'estimer le comportement dans des conditions d'APRP (ou d'accident de réactivité). Étant donné qu'il est irréalisable d'exécuter des essais intégraux sur toutes les variétés de gainage, une méthode sera mise au point pour utiliser les informations relatives à un type de gainage afin de déterminer les propriétés d'autres types de gainage, dans l'hypothèse où les types de gainage ne sont pas trop différents ; et
2. procéder à des essais de calculs repères et à des mesures appropriés sur des gainages neufs (à savoir, des matériaux déposés provenant d'essais antérieurs de la NRC et des

matériaux homologues pour les éprouvettes à taux de combustion élevé) afin d'établir les propriétés à faible taux de combustion des matériaux actuels et de vérifier la cohérence avec les résultats antérieurs.

Il sera procédé à trois types d'essais :

1. des études d'oxydation, dont on a besoin pour mettre au point ou valider les modèles de cinétique utilisés dans les modèles d'évaluation ;
2. des essais de trempe dans des conditions simulées d'APRP afin d'évaluer les critères de réception actuels, ou d'établir une base de données relative à de nouveaux critères si cela est nécessaire ; et
3. des essais relatifs à la réaction des structures pour déterminer si les charges mécaniques externes pourraient altérer la configuration permettant le refroidissement ou entraver l'insertion des barres de commande.

6.2 Projet de réacteur de Halden

Le projet OCDE de réacteur de Halden en Norvège est une entreprise commune associant des organisations nationales et des organismes l'industrie appartenant à 20 pays, qui co-patronnent des travaux de recherche financés conjointement. Grâce à des possibilités avancées d'instrumentation interne du cœur, les essais réalisés à Halden représentent la source d'informations essentielles, par exemple sur les températures du combustible, la libération de gaz de fission et l'interaction pastille-gaine en cours de fonctionnement. Ces dernières années, le programme s'est de plus en plus focalisé sur le comportement du combustible à fort taux de combustion dans des conditions de puissance à la fois normales et anormales. À cette fin, des combustibles à taux de combustion élevé récupérés dans des réacteurs de puissance commerciaux, ont été transférés à Halden et refabriqués sous forme de petits barreaux d'essai instrumentés. Ces derniers ont été insérés dans des sections d'essai, et en fonction des impératifs des essais, dans des boucles de REO. Outre du combustible UO_2 à fort taux de combustion, le projet de Halden est une source cruciale de données en réacteur relatives aux combustibles MOX. L'actuel programme de Halden se propose d'étudier des taux de combustion de l'ordre de 50 à 80 MWj/kg et envisage l'exécution d'une variété d'essais dans des conditions normales d'exploitation et lors de transitoires de puissance et/ou de refroidissement.

6.3 Programme de R-D de Belgonucléaire

Depuis 1965, les travaux de R-D menés chez Belgonucléaire sont en grande partie consacrés à étayer l'augmentation du taux de combustion dans les REO, l'accent étant spécialement mis sur le combustible MOX. À cet égard, les programmes internationaux gérés par Belgonucléaire fournissent une base de données commune à toutes les organisations participantes. Une attention particulière est portée à l'évolution, en fonction du taux de combustion, des caractéristiques neutroniques du combustible et du comportement thermomécanique des barreaux en réacteur. On trouvera ci-après certains des éléments essentiels de ce programme ; pour une description plus détaillée, voir par exemple les grandes lignes du programme 1999 [22].

Le taux de combustion du Pu dans du combustible MOX se caractérise essentiellement par une baisse de la teneur en ^{239}Pu . Les autres isotopes du Pu présentent une concentration presque inchangée, en raison de la surgénération interne. La chute de la réactivité du combustible MOX en fonction de la combustion massique est par conséquent beaucoup moins marquée que dans du

combustible UO_2 . La concentration des actinides mineurs Am et Cm devient notable à mesure que le taux de combustion augmente : ces nucléides commencent à jouer un rôle en ce qui concerne la réactivité globale et la production d'hélium.

On constate que le comportement thermomécanique du combustible MOX est très semblable à celui de l' UO_2 . Il existe cependant certaines différences spécifiques. La meilleure résistance à l'interaction pastille-gaine admise pour le combustible MOX a récemment été confirmée. Trois segments de combustible MOX pour REP pré-irradiés à un taux de combustion atteignant 58 MWj/kg ont été soumis à des rampes respectivement de 100 W/cm/min à 430-450-500 W/cm/min, suivies d'un temps de rétention de 24 heures : aucune défaillance du combustible n'a été observée.

Les combustibles MOX et UO_2 semblent avoir un niveau de réactivité différent qui aboutit généralement à une évolution de la puissance dans le temps différente. En outre, la distribution radiale de puissance dans une pastille de MOX se révèle moins déprimée à taux de combustion élevé que dans le cas de l' UO_2 , ayant pour effet une température au centre du combustible plus élevée pour une même puissance nominale. Par ailleurs, on constate que la conductivité thermique du combustible MOX diminue avec la teneur en Pu (habituellement de 4 % pour 10 % de Pu). La combinaison de ces trois éléments (historique de puissance, profil de distribution de puissance et conductivité) aboutit à une fraction de gaz de fission plus élevée à fort taux de combustion, par comparaison à l' UO_2 .

On constate que la production d'hélium demeure faible par comparaison avec la production de gaz de fission (ratio $< 0,2$). Comme il s'agit de l'élément dont la diffusion est la plus rapide, le rejet fractionnaire d'hélium est bien supérieur à celui des gaz de fission, entraînant un accroissement de la pression interne dans le barreau comparable à celui résultant des gaz de fission.

6.4 CABRI

Le réacteur d'essai CABRI implanté à Cadarache, France, qui se compose d'un cœur de combustible d'entraînement dans une piscine d'eau avec une boucle refroidi au sodium (Na), est exploité par l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) et est utilisé pour tester des barreaux de combustible nucléaire dans des conditions d'accident de réactivité. Il est projeté de doter l'installation d'une boucle à eau, qui serait plus représentative des réacteurs de type REP. Le réacteur fournit des impulsions d'une durée d'environ 10 ms qui peuvent être portées à environ 80 ms. Des études relatives aux combustibles UO_2 et MOX hautement irradiés ont été entreprises en 1993. Sept essais ont été exécutés sur du combustible UO_2 et trois sur du combustible MOX. Dans le cas de l'un de ces trois essais, on a observé une défaillance du gainage (le barreau de MOX ayant le plus fort taux de combustion) alors qu'un barreau d' UO_2 testé dans des conditions comparable n'a pas connu de défaillance (voir section 5.3). La dispersion du combustible à partir du barreau défaillant et l'éjection de sodium à partir du voisinage du barreau ont été plus marquées que dans le cas des barreaux d' UO_2 ayant subi une défaillance. On estime que la migration accrue des gaz de fission vers les joints de grains et les porosités résultant des amas de Pu à forte concentration ont amené le combustible à se comporter différemment du combustible UO_2 dans ces conditions. L'IPSN projette de remplacer la boucle au sodium par une boucle à eau afin de simuler plus précisément les conditions d'un cœur de REP. Il est projeté d'exécuter dans cette installation des essais supplémentaires avec du combustible UO_2 et du combustible MOX à très fort taux de combustion.

6.5 TAGCIS/TAGGIR/HYDRAZIR

Un programme d'essai mené dans les laboratoires de Grenoble et de Chinon (France), sous le patronage de l'IPSN et d'EdF, est en cours en vue d'étudier les limites de fragilisation en cas d'APRP applicables au Zircaloy4 à fort taux de combustion. Les principaux résultats obtenus à ce jour sont les suivants :

- la pré-oxydation (en réacteur) de la gaine n'a pas d'effet protecteur de contre l'oxydation due au transitoire (APRP) ;
- on observe au cours du transitoire une accélération de la cinétique d'oxydation du Zircaloy4 irradié ou hydruré par rapport au Zircaloy4 neuf ;
- il n'y a pas transgression de la limite de 17 % pour les essais exécutés en l'absence de contraintes axiales [11].

Ces essais ne couvrent pas la phase à long terme de l'APRP en présence de charges hydrauliques, sismiques ou de manipulation.

6.6 CINOG

Un programme d'essai analogue à TAGCIS est en cours dans le laboratoire de Grenoble (France), sous le patronage de FRAMATOME et d'EdF et porte sur des gainages M4 et M5 neufs [12].

6.7 EDGAR

Un programme d'essai en cours dans le laboratoire de Saclay (France) sous le patronage de FRAMATOME et d'EdF, porte sur l'étude de la cinétique du changement de phase α/β , le gonflement et la rupture au cours d'un APRP de gainages M4 et M5 neufs [12].

6.8 NSRR

Le Réacteur de recherche sur la sûreté nucléaire (NSRR) de l'Institut de recherches sur l'énergie atomique du Japon (JAERI) à Tokai, qui est un réacteur de type TRIGA doté d'un cœur annulaire dans une piscine d'eau, est utilisé pour étudier le comportement des barreaux combustibles dans des conditions d'accident de réactivité. La durée des impulsions dans le réacteur est d'environ 5ms. On a commencé par exécuter des études visant à déterminer le comportement du combustible MOX neuf afin d'obtenir des informations de référence. Ces premiers essais ont reproduit les conditions d'essais antérieurs exécutés à l'aide de combustible à base d'uranium. On a constaté que le mécanisme et le seuil de défaillance du gainage pour le combustible MOX neuf étaient conforme à ceux relatifs au combustible UO₂ neuf, et que l'on ne détectait pas d'effet des particules de plutonium (défaut de compacité). Plus récemment, le JAERI a testé quatre barreaux de combustible MOX irradié (à 20 MWj/kg). Jusqu'aux limites de dépôt d'énergie testées à ce jour (enthalpie du combustible de 140 cal/g), aucune défaillance de gainage ne s'est produite dans ces éprouvettes à taux de combustion relativement faible. Cependant, les essais effectués dans le NSRR à l'aide de combustible MOX irradié ont mis en évidence une libération de gaz de fission plus élevée et un gonflement du combustible plus important que dans le cas du combustible UO₂ (en accord avec les résultats obtenus dans le réacteur CABRI), indiquant l'existence d'effets MOX dans le cas des accidents de réactivité.

7. RECOMMANDATIONS ET RÉSUMÉ

On trouvera ci-après un exposé récapitulatif de l'examen des divers critères en matière de sûreté et des sujets de préoccupation particuliers, parallèlement à des recommandations visant les actions complémentaires à mener.

7.1 Rapport de puissance critique / rapport d'échauffement critique

Il n'y a lieu de modifier, semble-t-il, ni les critères de sûreté, ni les méthodes permettant de les établir. Il paraît nécessaire de procéder à certains essais, notamment à des essais en vraie grandeur en vue d'établir une modélisation thermohydraulique appropriée des nouveaux modèles d'assemblages. De plus, il faudra apporter des améliorations aux méthodes statistiques, telles que la capacité de calculer en détail la puissance des aiguilles offerte par les méthodes tridimensionnelles modernes en régime stationnaire.

Les corrélations du rapport de puissance critique et du rapport d'échauffement critique sont en général élaborées à partir de données relatives à des tubes de gainage neufs non oxydés ou légèrement oxydés, et peuvent ne pas être exactes pour des gainages à taux de combustion élevé. Ainsi, l'effet de l'oxydation sur l'état de surface devrait être examiné.

7.2 Coefficients de réactivité

Bien que les coefficients de réactivité puissent être influencés par de nouveaux éléments de dimensionnement, on ne considère pas que ces effets aient une incidence sur les critères de sûreté correspondants proprement dits.

7.3 Marge d'arrêt

On estime que les critères en matière de marge d'arrêt ne sont pas influencés par les nouveaux éléments de dimensionnement. Si l'on utilise une modélisation réaliste ou du type meilleure estimation pour établir ou analyser ces critères, de tels modèles devraient être soigneusement vérifiés ; en particulier, l'incertitude entachant la modélisation devrait être quantifiée afin d'évaluer la marge à la sûreté.

7.4 Enrichissement

Des limites d'enrichissement de 5 % en poids d'²³⁵U sont utilisées en liaison avec les considérations de criticité applicables à la fabrication, à la manutention et au transport. Pour certaines applications à fort taux de combustion, des enrichissements supérieurs peuvent être nécessaires. Des niveaux élevés d'enrichissement exigeront l'évaluation de la validité des programmes de calcul de sûreté-criticité et des équipements destinés à la fabrication, à la manutention, au transport et au

stockage du combustible. Par ailleurs, il convient de se pencher sur la possibilité d'un retour à l'état critique au cours d'accidents, en particulier dans les séquences de fusion du cœur des accidents graves.

7.5 Dépôt d'impuretés

Les critères applicables au dépôt d'impuretés sont considérés comme des critères « dérivés », et seulement indirectement liés à la sûreté. Il est probable qu'aucune limite ferme n'est en l'occurrence nécessaire, car des critères relatifs aux phénomènes limitatifs (oxydation, hydruration, interaction pastille-gaine) sont déjà en place.

7.6 Niveau de déformation

En l'occurrence, il apparaît que les limites de dimensionnement de même que les méthodes permettant de les vérifier sont bien établies. Toutefois, du fait que les propriétés mécaniques du combustible dépendent de la composition, de la fabrication, de la fluence et de la teneur en hydrogène des matériaux, elles seront clairement influencées par de nouveaux éléments de dimensionnement, en particulier par un fort taux de combustion. En conséquence, il est essentiel de vérifier en permanence les modèles de conception du combustible afin de faire en sorte de disposer d'une base appropriée pour le dimensionnement et l'exploitation.

7.7 Oxydation et hydruration

Dans certains pays, il n'existe pas de critères officiels ayant trait à l'épaisseur de la couche d'oxydes et à la concentration en hydrures. Cependant, les oxydes et les hydrures influent sur le comportement du point de vue des contraintes et des déformations, et en définitive sur la résistance à la rupture du matériau de gainage. C'est pourquoi, il convient d'envisager de fixer des limites à l'épaisseur de la couche d'oxydes et à la concentration en hydrures.

Étant donné que la corrosion du zircaloy est l'un des principaux paramètres qui limitent la durée de vie du combustible nucléaire, il existe un motif d'examiner le caractère adéquat des limites actuellement applicables aux niveaux maximaux d'oxydation et d'hydruration locales du gainage, en considération notamment des performances du combustible à fort taux de combustion.

7.8 Pression interne des gaz

La pression interne des gaz dans les barreaux peut avoir un effet important sur le comportement du gainage du combustible lors de transitoires ou d'accidents hypothétiques. Deux critères possibles – l'un absolu (par rapport à la pression du CPP) l'autre relatif (décollage) – visant la pression interne acceptable des gaz sont actuellement utilisés dans divers pays par leurs autorités réglementaires. Pour le combustible MOX, la libération de gaz de fission est supérieure par comparaison avec le combustible UO₂, et il convient d'étudier le bien-fondé du critère relatif (décollage) visant la pression interne acceptable des gaz dans le barreau combustible.

Ces critères ne devraient pas être affectés par de nouveaux éléments de dimensionnement, bien que les méthodes permettant de démontrer la conformité à ces critères le soient.

7.9 Charges thermomécaniques, interaction mécanique pastille-gainage

Les données expérimentales existantes concernant l'interaction mécanique pastille-gainage pour le combustible de REO ne donnent pas à penser que les effets de cette interaction soient dissuasifs à taux de combustion élevé. Cependant, comme ces expériences visaient habituellement à étudier d'autres effets des taux de combustion élevés tels que la libération de gaz de fission, ces données sur l'interaction mécanique pastille-gainage ont été obtenues de façon « subsidiaire ».

Il existe certaines préoccupations visant l'effet d'un fort taux de combustion qu'il convient de prendre en compte en exécutant davantage d'essais directement axés sur l'interaction mécanique pastille-gainage. Des programmes de calcul de conception et de performance du combustible peuvent être utilisés à cet effet, à condition qu'ils soient convenablement testés à l'aide de calculs repères, validés et vérifiés par comparaison avec des données expérimentales. En outre, il semble justifié de procéder à quelques essais supplémentaires relatifs à l'interaction mécanique pastille-gainage, afin de tester ces programmes de calcul à l'aide de calculs repères et d'en vérifier les résultats.

Le critère fondamental de sûreté – prévention de la rupture mécanique de la gaine – n'est pas influencé par de nouveaux éléments de dimensionnement, encore que la limite actuelle (déformation de 1 %) puisse changer.

7.10 Limites thermomécaniques d'exploitation

Il convient d'introduire d'une manière générale des méthodes de type meilleure estimation ou statistiques permettant de déterminer les limites thermomécaniques d'exploitation couvrant des modèles modernes de combustible et de cœur.

7.11 Interaction pastille-gaine (IPG)

Bien que, dans la plupart des pays, les limites de l'IPG ne figurent pas dans les autorisations, elles concernent effectivement le comportement sûr du combustible. Il est recommandé de poursuivre les essais en présence de rampe de puissance afin d'améliorer la base à de forts taux de combustion et de la manière appropriée pour le modèle de combustible adopté. Parallèlement, des modèles de performance du combustible devraient être perfectionnés et testés à l'aide de calculs repères par rapport aux résultats de ces essais de rampe.

7.12 Accident de réactivité – fragmentation et défaillance du combustible

La **limite de fragmentation** de combustible de l'ordre de 23-280cal/g peut bien être suffisante pour garantir une configuration permettant le refroidissement pour de combustible neuf et à très faible taux de combustion. Pour l'évaluation de cette limite à des taux de combustion élevés, on a besoin de mieux comprendre le processus de fragmentation et les effets d'un fort taux de combustion (en particulier l'effet de la zone de « rim » et des amas de MOX) sur cette limite. Une vérification par comparaison avec des expériences d'accident de réactivité plus réalistes (projetée à l'aide de la boucle à eau dans le réacteur CABRI) est donc souhaitable. Cette meilleure compréhension devrait aussi contribuer à améliorer la modélisation au moyen des programmes de calcul des performances du combustible.

Dans la plupart des pays, l'actuelle **limite de défaillance du combustible en cas d'accident de réactivité** se fonde sur la définition figurant dans la section 4.2 du Plan standard d'examen américain [23], s'agissant d'une valeur maximale de l'enthalpie radiale moyenne du combustible de 170 cal/g pour les REB et du critère de l'échauffement critique pour les REP. Sur la base de certaines des expériences d'accident de criticité exécutées au cours des années 90 dans les réacteurs CABRI et NSRR, à l'aide de barreaux combustibles à des taux de combustion de l'ordre de 50 MWj/kg voire davantage, une évaluation du caractère approprié de cette limite est apparue souhaitable. À cet égard, diverses valeurs limites en fonction du taux de combustion ont été proposées sur la base soit d'interprétation de données expérimentales directes, soit de paramètres pertinents, tels que l'épaisseur de la couche d'oxydes du gainage.

Ainsi, en particulier dans la fourchette de valeurs plus élevées du taux de combustion, où les données expérimentales font défaut, il convient de poursuivre la recherche des critères de sûreté fondés sur des facteurs techniques et la vérification des modèles analytiques relatifs aux performances du combustible. En l'occurrence, le futur programme expérimental CABRI, dont l'installation d'essai sera modifiée afin d'inclure une boucle à eau de REP, est susceptible de fournir des résultats très intéressants. En outre, les essais dans le réacteur NSRR et les essais portant sur des effets distincts dans des installations telles que PROMETRA, PATRICIA, SILENE (France), de même que les résultats du programme d'essai de l'ANL [13] (États-Unis) et ceux du programme d'essai du JAERI [17] (Japon) devraient fournir des informations dignes d'intérêt.

7.13 Fragilisation et/ou oxydation du gainage

Hors APRP : Certains accidents autres que des APRP sont analysés en vue d'estimer les doses d'irradiation délivrées au public et de démontrer que la possibilité de refroidissement du cœur est maintenue. Pour des accidents tels que l'accident de blocage du rotor d'un REP, l'échauffement critique est utilisé pour indiquer la défaillance du gainage pour les calculs de dose, et une température de 2 700°F est parfois utilisée pour démontrer la possibilité de refroidissement. Le comportement du combustible à fort taux de combustion dans ces conditions est relativement mal connu. La pertinence du critère susmentionné devrait donc être confirmée par voie expérimentale.

APRP : les critères actuels stipulent que la température de pointe du gainage devrait demeurer en dessous de 2 200°F et que l'oxydation du gainage ne devrait pas dépasser 17 % (15 % dans certains pays) afin d'éviter la fragilisation et/ou la fragmentation au cours d'un APRP. Ces critères sont fondés sur des essais qui ont été exécutés sur du gainage non irradié. Pour des applications à taux de combustion élevé, les 17 % sont maintenant souvent interprétés comme correspondant au niveau total d'oxydation, ce qui peut constituer une hypothèse empreinte de conservatisme. La question de savoir si l'oxydation en cours d'exploitation normale doit être prise en compte et de quelle manière, n'est pas résolue. Ce point est relativement important, car il n'est pas inhabituel d'observer une oxydation uniforme atteignant environ 100 µm dans du combustible fortement irradié. Les essais français [11] et japonais [12] en cours, de même que ceux de l'ANL [13] seront, espère-t-on, suffisants pour vérifier les critères de sûreté actuels et pour perfectionner et valider la modélisation des APRP pour de nouveaux modèles de combustible et à taux de combustion élevé.

Dans l'ensemble, les critères de sûreté pour les APRP sont encore considérés comme appropriés pour les combustibles modernes afin de répondre aux limitations fondamentales visant la possibilité de refroidissement du cœur et le rejet de radioactivité. On estime que les résultats des essais susmentionnés, conjointement avec des essais complémentaires de ductilité concernant le comportement à long terme en cas d'APRP, devraient être suffisants pour vérifier les actuels critères

de sûreté, en ce qui concerne notamment l'effet du taux de combustion, et pour perfectionner et valider la modélisation des APRP.

7.14 Dépressurisation et/ou chargements sismiques

Les critères de sûreté dans ce domaine ne sont pas directement influencés par les nouveaux éléments de dimensionnement. Étant donné que la conformité aux critères est démontrée par des moyens analytiques, les méthodes utilisées pour analyser les séismes et/ou phénomènes d'APRP devraient être convenablement vérifiées et validées.

7.15 Force de maintien de l'assemblage

Les critères de sûreté dans ce domaine ne sont pas considérés comme étant influencés par de nouveaux éléments de dimensionnement. Là encore pour la vérification analytique de ces critères, il importe que des modèles suffisamment bien validés et vérifiés soient en place ; en outre, il faut disposer des propriétés des matériaux, notamment à fort taux de combustion, pour être à même de choisir et d'analyser convenablement ces matériaux.

7.16 Activité dans le réfrigérant

Aucune modification de la (ou des) limite(s) dans ce domaine n'est probable en liaison avec de nouveaux éléments de dimensionnement.

7.17 Activité dans l'intervalle combustible-gaine

Les fractions rejetées admises en hypothèse dans les analyses de sûreté ne sont pas des critères de sûreté, mais représentent des valeurs empreintes de conservatisme utilisées à des fins de dimensionnement. On constate que le rejet de produits de fission dans l'intervalle augmente à taux de combustion élevé ; on relève une amplification analogue pour du combustible MOX par rapport aux valeurs enregistrées pour de l' UO_2 . Ces augmentations des rejets peuvent exiger de modifier les hypothèses relatives à l'activité dans l'intervalle combustible-gaine qui sont utilisées dans les analyses de sûreté.

7.18 Terme source

On considère peu probable que de nouveaux éléments de dimensionnement ou un taux de combustion élevé exercent un effet notable sur le terme source ou sur la progression de la fusion du cœur. Cette conclusion se fonde cependant sur une évaluation limitée et pourrait être modifiée par une évaluation plus approfondie.

7.19 Méthodes d'analyse

À mesure que les cœurs de réacteurs deviennent plus hétérogènes, la capacité des programmes de calcul actuels d'analyser le comportement, au cours de transitoires, de grappes de combustible à fort taux de combustion et neuf devrait être vérifiée. Les activités de mise au point de programmes de calcul sont largement répandues, et les modèles et corrélations en jeu dans ces

programmes de calcul sont nombreux par comparaison avec les critères de sûreté du combustible examinés plus haut. C'est pourquoi, le Groupe de travail n'a pas cherché à recenser tous les programmes de mise au point et les nombreux modèles et corrélations en cause. Plusieurs types de programmes de calcul, qui sont utilisés dans l'analyse de sûreté, sont sensibles aux paramètres liés au combustible. Dans les précédentes sections de ce rapport, la nécessité de poursuivre la mise au point et la vérification des programmes de calcul a été évoquée à maintes reprises ; de nouveaux éléments de dimensionnement, tels que des matériaux de gainage différents, un taux de combustion plus élevé, et l'utilisation de combustibles MOX, peuvent influencer sur l'efficacité de ces programmes de calcul. Certaines des incidences les plus importantes sur ces programmes de calcul ont été mentionnées afin de déterminer si ces programmes auraient besoin d'être davantage vérifiés, voire modifiés. Des exemples ont été fournis au lieu de couvrir systématiquement tous les modèles et effets possibles ; cela devrait être suffisant pour cerner les domaines d'analyse qui ont besoin d'être traités de façon plus approfondie.

Afin de couvrir convenablement les modèles modernes de combustible et de cœur, les méthodes de type réaliste déjà mentionnées, conjointement avec l'analyse des incertitudes connexes, devraient être appliquées de façon générale de manière à réduire le degré inutile de conservatisme. Cela implique cependant que de telles méthodologies soient convenablement validées et vérifiées ; ainsi, des essais expérimentaux devront continuer de fournir la base d'une telle vérification et validation.

7.20 Programmes relatifs au combustible à fort taux de combustion

Ces dernières années, des informations plus abondantes sont devenues disponibles concernant le comportement du combustible fortement irradié. Cela a fourni une base supplémentaire pour l'exploitation du combustible et/ou du cœur à des niveaux du taux de combustion atteignant ceux actuellement autorisés. Toutefois, le Groupe de travail estime également qu'il est nécessaire de poursuivre les recherches afin de :

- vérifier expérimentalement la validité des critères de sûreté à taux élevé de combustion, en particulier à des niveaux des taux de combustion dépassant ceux actuellement autorisés ; et
- perfectionner et tester à l'aide de calculs repères les modèles analytiques utilisés pour définir et assurer le suivi des critères de sûreté à taux de combustion élevé.

On a donné quelques exemples de programmes de recherche qui contribuent à l'étude des phénomènes et des mécanismes en jeu dans le comportement du combustible dans des conditions de transitoires et/ou d'accidents. Il s'agit notamment du Projet de réacteur de Halden en Norvège, des essais en cellule chaude exécutés au Laboratoire national d'Argonne aux États-Unis, des travaux de recherche et de développement menés par Belgonucléaire en Belgique, du réacteur d'essai CABRI et des programmes connexes en France, et du programme de Réacteur de recherche sur la sûreté nucléaire (NSRR) au Japon. La poursuite de ces programmes est souhaitable.

7.21 Conclusion

On estime que le cadre actuel des critères de sûreté du combustible demeure applicable de façon générale, étant pour large part non affecté par les éléments de dimensionnement « nouveaux » ou modernes ; les niveaux (valeurs) des divers critères de sûreté peuvent cependant changer en

conformité avec les caractéristiques particulière de conception du combustible et du cœur. Certains de ces niveaux ont déjà été – ou continuent d’être – ajustés ; des ajustements des niveaux de plusieurs autres critères (accident de réactivité, APRP) semblent aussi être nécessaires sur la base des données expérimentales et de leur analyse.

En vue de cette (ré)évaluation des critères de sûreté du combustible, la procédure suivante est recommandée :

- continuer de perfectionner des méthodes d’analyse (nominale) de type réaliste, conjointement avec une analyse appropriée des incertitudes, dans tous les domaines d’analyse de la sûreté ;
- continuer de procéder à la vérification expérimentale (expériences choisies), en vue de tester par des calculs repères de telles méthodes réalistes et d’étendre la base de vérification aux critères de sûreté (l’importance des essais pouvant être réduite à mesure que la qualité des méthodes s’améliore) ;
- examiner, et ajuster s’il y a lieu, les niveaux des critères de sûreté fondés sur les méthodes et données d’essai susmentionnées ; définir (quantifier) la marge requise aux limites de sûreté.

Le Groupe de travail considère que des programmes de recherche comme ceux de Halden, de l’ANL, de la France et du Japon et les nombreuses installations d’essai, notamment les boucles d’essai CABRI et NSRR, sont nécessaires pour étayer les travaux de mise au point de l’industrie, car ceux-ci contribueront à une représentation plus détaillée et plus réaliste des scénarios d’accident des REO.

8. REMERCIEMENTS ADRESSÉS AUX MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL ET REMARQUE RELATIVE AU CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport fait la synthèse des diverses contributions, parfois très exhaustives et détaillées émanant des divers experts qui ont fait partie du Groupe de travail. Ces contributions ont comporté l'examen d'une variété de domaines différents, selon les compétences des divers experts.

Dans plusieurs cas, les résultats détaillés, dont il a été fait état dans ce rapport, correspondent à une opinion majoritaire mais pas nécessairement à l'opinion de chacun des membres du Groupe. Cependant, tous les membres du Groupe de travail souscrivent pleinement aux conclusions globales et aux recommandations.

En outre, le contenu du rapport ne représente pas nécessairement l'opinion des organisations auxquelles appartiennent les divers membres du Groupe.

Les membres suivants du Groupe de travail ont contribué au présent rapport :

Pays	Membre du Groupe de travail
Allemagne	H. Gross
Belgique	N. Hollasky
Espagne	M. Recio
États-Unis	R.O. Meyer
Finlande	K. Valtonen
France	G. Hache
Pays-Bas	K. Bakker
Royaume-Uni	J. Killeen
Suisse	G. Bart, M. Zimmermann, W. van Doesburg

M. T. Speis (précédemment à la NRC) qui a fourni l'ébauche du plan de ce rapport, ainsi que M. C. Vitanza (qui appartient maintenant à l'AEN/OCDE) et M. F. Eltawila (NRC) qui ont formulé de très utiles commentaires, ont apporté une précieuse contribution à l'établissement de ce rapport.

9. GLOSSAIRE

Acronyme /abréviation	Signification
APRP	accident de perte de réfrigérant primaire
CPP	circuit primaire principal
EPR	évaluation probabiliste des risques
IMPG	interaction mécanique pastille-gainage
IPG	interaction pastille-gaine
MOX	combustible à mélange d'oxydes
REB	réacteur à eau bouillante
REC	rapport d'échauffement critique
REO	réacteur à eau ordinaire
REP	réacteur à eau sous pression
RIA	accident (dû à un apport) de réactivité

RÉFÉRENCES

1. W. Wiesenack, « Review of Halden reactor project high burnup fuel data that can be used in safety analyses » (Examen des données relatives au combustible à taux de combustion élevé obtenues par le projet de réacteur de Halden, qui sont susceptibles d'être utilisées dans des analyses de sûreté), *Nuclear Engineering and Design* 172 (1997), p. 83-92.
2. Titre 10 du Code de la réglementation fédérale, Partie 50 – Appendice A, « General Design Criteria for Nuclear Power Plants » (Critères généraux de conception applicables aux centrales nucléaires).
3. EPRI RS-103515-R1 « BWR Water Chemistry Guidelines » (Guide relatif à la chimie de l'eau dans les REB) (Révision 1996).
4. Rapports des réunions élargies du Projet Halden, des réunions de la KTG, ou d'autres réunions thématiques telles que le Symposium international sur le combustible MOX de l'AIEA (Vienne, 17-21 mai 1999) ou le séminaire international sur le comportement thermique du combustible des REO organisé par l'AEN/OCDE et l'AIEA (Cadarache, 3-6 mars 1998).
5. *Nuclear Safety* Vol. 21, No. 5, septembre-octobre 1980 « Assessment of LWR fuel damage during a reactivity initiated accident » (Évaluation de l'endommagement du combustible de REO au cours d'un accident de réactivité), P.E. McDonald *et col.*
6. T. Fuketa *et col.* « Behavior of high burnup PWR fuel under a simulated RIA condition in the NSRR » (Comportement du combustible de REP à fort taux de combustion dans des conditions simulées d'accident de réactivité dans le réacteur d'essai NSSR), Réunion de spécialistes du CSIN sur le comportement du combustible à taux de combustion élevé pendant les transitoires, Cadarache, France, 12-14 septembre 1995, et F. Schmitz, « The CABRI REP-Na test program: principal findings et conclusions from the five tests on the CABRI RIA programme » (Le programme d'essai CABRI REP-Na : principaux résultats et conclusions des cinq essais inscrits au programme CABRI RIA), Réunion de l'ACRS, USNRC, 10 avril 1996.
7. US Nuclear Regulatory Commission « Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants », NUREG-0800..
8. R.O. Meyer *et col.*, *Nuclear Safety* 37, 1996.
9. V. Asmolov *et col.* « Summary of results on the behavior of VVER high burnup fuel rod RIA tests » (Essais relatifs au comportement des barreaux de combustible VVER à taux de combustion élevé lors d'un accident de réactivité : synthèse des résultats), 27^{ème} réunion sur la sûreté des réacteurs à eau, NRC, octobre 1999.
10. C. Grandjean et Ch. Lebuffe, « High burnup fuel cladding embrittlement under LOCA conditions » (Fragilisation du combustible à fort taux de combustion dans des conditions

d'APRP), Topical meeting on safety of operating reactors (Réunion thématique sur la sûreté des réacteurs en exploitation) Seattle, 17-20 septembre 1995 ; C. Grandjean *et col.*, « French investigations of high burnup effects on LOCA thermomechanical behavior » (Études françaises des effets du taux de combustion élevé sur le comportement thermomécanique en cas d'APRP), 26th Water Reactor Safety Meeting, NRC, octobre 1998.

11. J.P.Mardon *et col.* « Update on the development of advanced zirconium alloys for PWR fuel claddings » (État d'avancement de la mise au point d'alliages avancés au zirconium pour les gainages des combustibles de REP), Topical meeting on LWR fuel performance (Réunion thématique sur les performances des combustibles de REO), Portland, 2-6 mars 1997 ; T. Forgeron *et col.*, « Experiment and modeling of advanced fuel rod cladding behavior under LOCA conditions: α - β phase transformation kinetics and EDGAR methodology » (Expérience et modélisation du comportement du gainage des barreaux combustible de type avancé dans des conditions d'APRP : cinétique de la transformation de phase α - β et méthodologie EDGAR) 12th Meeting on Zirconium in the Nuclear Industry, Toronto, 15-18 juin 1998.
12. IPS-263-Rev.2 « Test plan for the investigation of high burnup LWR cladding under LOCA and other transient conditions » (Plan d'essais en vue de l'étude du gainage du combustible des REO à taux de combustion élevé dans des condition d'APRP et d'autres conditions transitoires), Energy Technology Division, Laboratoire national d'Argonne, octobre 1998.
13. D.E. Bassette, « Initial and boundary conditions to LOCA analysis – an examination of requirements of Appendix K » (Conditions initiales et limites applicables à l'analyse des APRP : examen des prescriptions de l'Appendice K) 10th International Conference on Nuclear Energy, Baltimore MD, avril 2000.
14. J.H. Schaperow et J.Y. Lee « Implementation of the Revised Source Term at US operating reactors » (Mise en œuvre de la valeur révisée du terme source dans les réacteurs en exploitation des États-Unis), 27th Water Reactor Meeting, NRC, octobre 1999 [ref. NUREG-1465 « Accident Source Term for LWRs » (Terme source en cas d'accident applicable aux REO) de février 1995].
15. D. Lanning *etcol.*, NUREG/CR-6534, 1997.
16. AEN/OCDE Rapport NEA/CSIN/R(96)23 « Transient behaviour of high burnup fuel » (Comportement du combustible à taux de combustion élevé en régime transitoire), 1996
17. T. Fujishiro, K. Ishijima, « NSRR experiments to study the effects of burnup on the fuel behavior under Reactivity Initiated Accident conditions » (Expériences exécutées dans le réacteur NSRR en vue d'étudier les effets du taux de combustion sur le comportement du combustible dans des conditions d'accident de réactivité), 22nd Water Reactor Safety Meeting, NRC, octobre 1994, et T. Fuketa, « JAERI research on fuel rod behavior during accident conditions » (Recherches menées par le JAERI sur le comportement des barreaux combustibles dans des conditions accidentelles) 27th Water Reactor Safety Meeting, NRC, octobre 1999.
18. F. Schmitz *et col.* « Investigations of the behavior of high burnup PWR fuel under RIA conditions in the CABRI test reactor » (Recherches sur le comportement du combustible REP à fort taux de combustion dans des conditions d'accident de réactivité menées dans le réacteur d'essai CABRI), 22nd Water Reactor Safety Meeting, NRC, octobre 1994 ; F. Schmitz *et col.* « The status of the CABRI test program – recent results and future activities » (État d'avancement du programme d'essai CABRI – résultats récents et activités futures), 24th Water

Reactor Safety Meeting, NEC, octobre 1996 ; J. Papin, F. Schmitz, « Further results and analysis of MOX fuel behavior under reactivity accident conditions in CABRI » (Résultats complémentaires et analyse du comportement du combustible MOX dans des conditions d'accident de réactivité dans le réacteur d'essai CABRI) 27th Water Reactor Safety Meeting, NRC, octobre 1999.

19. Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Safety of Operating Reactors [session sur « Safety Aspects Burning and Recycle of Pu and HEU fuel » (L'incinération et le recyclage du Pu et du combustible à uranium hautement enrichi considérés du point de vue de la sûreté)], 11-14 octobre 1998.
20. Rapport N°7170 du Système de notification des incidents de l'AEN/AIEA, juin 1998.
21. R. Carr, « Fuel cleaning with advanced ultrasonics: demo at Callaway » (Nettoyage du combustible à l'aide de techniques avancées par ultrasons : démonstration à la centrale de Callaway), 29th IUNFPC International Fuel Performance Conference, St. Louis, 15-18 août 1999.
22. M. Lippens *et col.*, « Highlights on R&D work related to the achievement of high burnup with MOX fuel in commercial reactors » (Faits saillants des travaux de R-D relatifs à l'obtention d'un taux de combustion élevé à l'aide de combustible MOX dans des réacteurs de type commercial), IAEA-SM-358, International symposium on MOX fuel cycle technologies, Vienne, 17-21 mai 1999.
23. US Nuclear Regulatory Commission Standard Review Plan NUREG-0800.

L'AEN remercie le Gouvernement du Japon pour avoir
facilité la production de ce rapport.

本報告書の作成に関し、日本政府の協力に謝意を表す。

ÉGALEMENT DISPONIBLE

Publications de l'AEN d'intérêt général

Rapport annuel 2000 (2001) Gratuit sur demande.

AEN Infos

ISSN1605-959X

Abonnement annuel : € 37 US\$ 45 GBP 26 ¥ 4 800

Le Point sur l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques (2000)

ISBN 92-64-28425-7

Prix : € 20 US\$ 20 GBP 12 ¥ 2 050

Programmes de gestion des déchets radioactifs des pays Membres de l'AEN/OCDE (1998)

ISBN 92-64-26033-1

Prix : € 32 US\$ 33 GBP 20 ¥ 4 150

Sûreté

Investing in Trust: Nuclear Regulators and the Public (2001)

ISBN 92-64-19314-6

Prix : € 60 US\$ 54 GBP 37 ¥ 6 050

Assuring Nuclear Safety Competence into the 21st Century (2000)

ISBN 92-64-18517-8

Prix : € 55 US\$ 50 GBP 31 ¥ 5 300

Nuclear Safety Research in OECD Countries – Major Facilities and Programmes at Risk (2001)

ISBN 92-64-18468-6

Gratuit : versions papier ou web.

Nuclear Safety Research in OECD Countries – Summary Report of Major Facilities and Programmes at Risk (2001)

ISBN 92-64-18463-5

Gratuit : versions papier ou web..

Déclaration collective sur le rôle de la recherche dans un contexte de réglementation nucléaire (2001)

Bilingue

Gratuit : versions papier ou web..

Maintenir à l'avenir les compétences en sûreté nucléaire – Mesures spécifiques (2001)

ISBN 92-64-28462-1

Gratuit : versions papier ou web..

Améliorer l'efficacité des autorités de sûreté nucléaire (2001)

ISBN 92-64-28465-6

Gratuit : versions papier ou web.

Réglementation de l'énergie nucléaire face à la concurrence sur les marchés de l'électricité (2001)

Bilingue.

ISBN 92-64-08460-6

Gratuit : versions papier ou web.

Nuclear Power Plant Operating Experiences from the IAEA/NEA Incident Reporting System 1996-1999 (2000)

ISBN 92-64-17671-3

Gratuit : versions papier ou web.

Stratégies d'intervention de l'autorité de sûreté en cas de dégradation de la culture de sûreté (2000)

Bilingue

ISBN 92-64-07672-7

Gratuit : versions papier ou web..

Rôle de l'autorité de sûreté dans la promotion et l'évaluation de la culture de sûreté (1999)

Bilingue.

Gratuit : versions papier ou web..

Bon de commande au dos.

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(66 2001 17 2 P) ISBN 92-64-29687-5 – n° 52290 2001