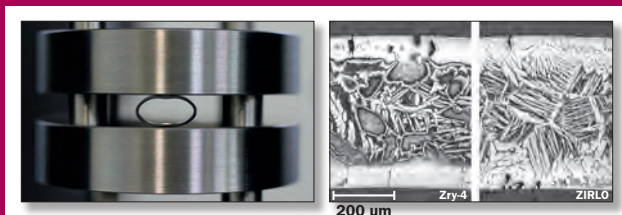


Avis techniques du CSIN N° 13

Méthodologies d'essai et bases
de calcul des critères APRP



Avis techniques du CSIN

N° 13

Méthodologies d'essai et bases de calcul des critères APRP

© OCDE 2011
AEN n° 6987

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 34 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Chili, le Danemark, l'Espagne, l'Estonie, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Israël, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République de Corée, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovaquie, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission européenne participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.

L'AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} février 1958. Elle réunit actuellement 30 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, la Pologne, le Portugal, la République de Corée, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovaquie, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission européenne 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.

Publié en anglais sous le titre :

CSNI Technical Opinion Papers No. 13: LOCA Criteria Basis and Test Methodology

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : www.oecd.org/editions/corrigenda.

© OCDE 2011

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.

Photos de couverture : test de compression d'un anneau (JAEA, Japon) ; coupe transversale d'une gaine de combustible, oxydée sous conditions représentatives d'un APRP (ANL, États-Unis).

Avant-propos

Les critères d'acceptation du circuit de refroidissement de secours du cœur définissent la température et le niveau d'oxydation à ne pas dépasser pour éviter la fragilisation excessive, et donc la rupture, des gaines de combustible, qui pourrait affecter le refroidissement du cœur dans le cas d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). Ces critères ont été établis principalement à partir de données expérimentales obtenues dans les années 1970 et 80. On a procédé à plusieurs types d'essais – essais de trempe semi-intégraux, de trempe sans chargement mécanique, de compression d'anneaux, de flexion et d'impact – pour évaluer l'intégrité structurale et la fragilisation des gaines dans les conditions d'un APRP, et appliqué diverses méthodologies pour déterminer les seuils de fragilisation des gainages. Avec l'emploi de plus en plus fréquent de combustibles à haut taux de combustion et de nouveaux alliages pour les gainages, il a été jugé utile d'engager une réflexion au niveau international sur les méthodologies d'essai et les critères d'acceptation.

Le Comité de l'AEN sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) a constaté que les différentes méthodologies d'essai ont conduit à des seuils presque identiques. Il a donc demandé à son Groupe de travail sur la sûreté du combustible (WGFS), chargé d'approfondir les différents aspects de la sûreté du combustible en évaluant les fondements techniques sur lesquels reposent les critères de sûreté actuels et leur applicabilité aux combustibles à haut taux de combustion et aux nouveaux matériaux et conceptions de combustibles, de rédiger le présent avis technique sur les méthodologies d'essai et bases de calcul des critères APRP. L'objectif de cet avis technique est d'examiner les différentes méthodologies d'essai et bases de calcul des critères APRP et de transmettre à la communauté internationale des recommandations sur la manière d'appliquer les résultats de ces méthodologies à des fins réglementaires.

Remerciements

Cet avis technique a été rédigé sur la base des déclarations et avis des membres du WGFS et des experts de diverses organisations. Le WGFS remercie notamment les personnes suivantes de leur inestimable contribution à l'élaboration du texte ou à la révision minutieuse de ce dernier :

Christian Bernaudat, EDF, France
Jean-Christophe Brachet, CEA, France
Toyoshi Fuketa, JAEA, Japon
Andreas Gorzel, IFSN, Suisse
Claude Grandjean, IRSN, France
Georges Hache, IRSN, France
Grigori Khvostov, IPS, Suisse
Stanislav Linhart, UJP, République tchèque
Marc Petit, IRSN, France
Jose Maria Rey, CSN, Espagne
Biya Sebbari, EDF, France
Marek Stepnievski, Vattenfall, Suède
Věra Vrtílková, UJP, République tchèque
Jinzhaio Zhang, Tractebel, Belgique

Le WGFS tient à exprimer tout particulièrement sa reconnaissance à Fumihisa Nagase (JAEA, Japon), qui a rédigé l'avis, dirigé le processus de révision et établi la synthèse des avis exprimés, ainsi qu'à Zoltán Hózer (AEKI, Hongrie) et John Voglewede (US NRC, États-Unis), dont les contributions ont été déterminantes.

Table des matières

Résumé	7
1. Contexte	11
2. Méthodologies d'essai existantes	13
2.1. Essais de trempe	13
2.1.1. Essais de trempe semi-intégral	13
2.1.2. Essais de trempe sans chargement mécanique	14
2.2. Essais post-trempe	14
2.2.1. Essais de compression d'anneaux	14
2.2.2. Essais de flexion	15
2.2.3. Essais d'impact	16
2.2.4. Essais de traction d'anneaux	17
2.3. Essais intégraux en pile	17
3. Principaux résultats obtenus par les différentes méthodologies	19
3.1. Essais de trempe	19
3.2. Essais mécaniques post-trempe	20
3.2.1. Essais de compression d'anneaux	20
3.2.2. Essais d'impact	21
4. Justification des bases de calcul des critères APRP	23
4.1. Justification des essais semi-intégraux	23
4.2. Justification des essais de compression d'anneaux	24
5. Comparaison et discussion	25
5.1. Étude comparative des essais de compression d'anneaux et de trempe semi-intégraux	25
5.2. Essais de flexion ou de compression d'anneaux	29

6. Recommandations	31
6.1. Essais de trempe	31
6.2. Essais de compression d'anneaux.....	31
6.3. Avis général.....	32
7. Synthèse	35
Références	37
Liste des abréviations	41

Tableau

1. Étude comparative des essais de compression d'anneaux et des essais de trempe semi-intégraux..... 26

Figures

1. Évolution des températures d'oxydation lors des essais de compression d'anneaux du CEA et de l'ANL 27
2. Comparaison des paramètres d'essai 28
3. Temps d'oxydation d'un gainage en Zircaloy-4 à 1 000 °C jusqu'à la transition ductile-fragile et la rupture fragile pendant la trempe sans contrainte 28
4. Courbes charge-déplacement indiquant la transition ductile-fragile lors d'essais de compression et de traction..... 32

Résumé

Les critères d'acceptation du circuit de refroidissement de secours du cœur définissent la température et le niveau d'oxydation à ne pas dépasser pour éviter la fragilisation excessive, et donc la rupture, des gaines de combustible, qui pourrait affecter le refroidissement du cœur dans le cas d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). Ces critères ont été établis principalement à partir de données expérimentales obtenues dans les années 70 et 80. Avec l'emploi de plus en plus fréquent de combustibles à haut taux de combustion et de nouveaux alliages pour les gainages, il a été jugé utile d'engager une réflexion au niveau international sur les méthodologies d'essai de fragilisation des gaines dans les conditions d'un APRP et les critères d'acceptation correspondants.

On a procédé à plusieurs types d'essais – essais de trempe semi-intégraux, de trempe sans chargement mécanique, de compression d'anneaux, de flexion et d'impact – pour étudier l'intégrité structurale et la fragilisation des gaines dans les conditions d'un APRP. Les États-Unis et de nombreux autres pays ont fondé leurs critères sur les résultats des essais de compression d'anneaux. Le Japon et la Russie, qui avaient initialement établi leurs critères sur des données et considérations analogues, ont ensuite élargi leurs bases techniques aux informations fournies par les essais de trempe semi-intégraux. D'autres paramètres et méthodologies d'essai ont aussi été utilisés par le passé pour déterminer les critères de fragilisation.

Dans le document intitulé « Review of High Burn-up RIA and LOCA criteria », le Comité de l'AEN sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) a constaté que les différentes méthodologies d'essai ont conduit à des seuils presque identiques [1]. Le Groupe de travail du CSNI sur la sûreté du combustible (WGFS) a proposé d'écrire le présent avis technique sur les méthodologies d'essai et bases de calcul des critères de fragilisation, proposition que le CSIN a approuvée. L'objectif de cet avis technique est d'examiner les différentes méthodologies d'essai et bases de calcul des critères APRP et de transmettre à la communauté internationale des recommandations sur la manière d'appliquer les résultats de ces méthodologies à des fins réglementaires.

Pour évaluer la tenue à la trempe d'un gainage, la première approche consiste à réaliser des essais de trempe sans chargement mécanique additionnel, dans lesquels seul l'effet des contraintes thermiques est considéré. On peut aussi effectuer un essai de trempe semi-intégral sous contrainte axiale pour obtenir des informations sur la tenue structurale du crayon combustible dans les conditions d'un APRP et sur sa résistance à la rupture, si elle se produit, au point le plus fragile. Ce type d'essai simule la séquence d'événements typiques d'un APRP jusqu'à la phase de trempe. En augmentant la durée d'oxydation à haute température, on peut directement déduire un critère de rupture. Il convient de poursuivre les travaux

dans ce domaine pour définir un chargement approprié à l'évaluation de l'intégrité du gainage pendant et après la trempe.

L'essai de compression d'anneaux a l'avantage de nécessiter une éprouvette de plus petite dimension, dont la préparation et le montage sur le banc d'essai sont plus simples. Toutefois, comme il ne concerne qu'une courte longueur de gaine sans combustible, il s'agit d'une certaine manière d'une étude du comportement et des propriétés locales du matériau. Les contraintes appliquées pendant l'essai sont, elles aussi, localisées et peuvent être supérieures à celles qui se produisent pendant la trempe. L'objectif d'un tel essai mécanique est d'identifier le seuil en deçà duquel le comportement du gainage reste ductile et, ainsi, d'éviter de s'interroger sur les forces auxquelles le gainage doit résister pendant ou après un APRP. Pour les essais de compression d'anneaux réalisés dans différents laboratoires, il importe que tous les expérimentateurs utilisent la même définition de la transition ductile-fragile. De plus, afin d'obtenir un consensus sur un critère de fragilisation du gainage, de nouvelles données et discussions approfondies seront nécessaires sur les procédures et les conditions d'essai, en particulier la température d'oxydation, la température d'essai, le point de prélèvement de l'échantillon sur la gaine oxydée/rompue et le scénario de refroidissement.

Puisque les éprouvettes destinées aux essais de compression sont généralement prélevées dans une zone sans ballonnement, elles peuvent ne pas donner une représentation complète du comportement du gainage dans la zone du ballon ni des autres phénomènes (hydruration secondaire, par exemple). Pour surmonter cette difficulté, on peut procéder à des essais de flexion. L'essai de flexion dans ce cas n'est qu'un autre moyen d'observer le comportement mécanique du gainage, mais en tenant compte de la zone ballonnée. Comparés aux essais semi-intégraux ou de compression d'anneaux, les essais de flexion destinés à l'étude du comportement des zones ballonnées des gainages sont peu nombreux. Il importerait de réaliser des essais de flexion dans différents laboratoires pour déterminer dans quelle mesure ce type d'essais peut servir à établir ou à confirmer les critères APRP.

Pour les comparaisons des résultats d'essais de compression d'anneaux et d'essais semi-intégraux, il convient de tenir compte des points suivants :

- Les deux méthodes fondent leur évaluation du processus de fragilisation des gaines de Zr en vapeur à haute température sur l'observation de mécanismes différents. Les échantillons soumis à des essais de compression d'anneaux sont généralement oxydés sous vapeur, tout comme ceux des essais de trempe. Mais les essais de trempe semi-intégraux peuvent donner une meilleure représentation du comportement d'un crayon combustible pendant un APRP, y compris le ballonnement de la gaine et l'hydruration secondaire en face interne du gainage après éclatement.
- Les deux méthodes renseignent sur des phénomènes quelque peu différents à des niveaux de fragilisation eux-mêmes différents. Dans des essais de compression d'anneaux, l'objectif final est de caractériser la transition ductile-fragile à l'aide de courbes charge-déplacement, et les conditions d'essai sont très reproductibles. En revanche, les essais de trempe semi-intégraux peuvent être assimilés à des « essais de résistance » permettant de déterminer dans quelle mesure le gainage oxydé peut résister aux

contraintes dues au choc thermique et aux autres chargements mécaniques ; la rupture de la gaine fragilisée peut être plus difficile à reproduire.

Qui plus est, les protocoles des essais de compression d'anneaux et de trempe semi-intégraux ne sont pas toujours les mêmes dans tous les laboratoires et pour toutes les séries d'essais, ce qui peut conduire à des résultats très différents.

Le présent avis technique décrit et compare les avantages et les inconvénients des méthodologies d'essai existantes et contient des recommandations concernant chaque méthodologie. Toutefois, il ne préconise pas de procédure normalisée pour définir les conditions expérimentales indispensables à l'établissement des critères de fragilisation, et ce pour plusieurs raisons :

- Les procédures et dispositifs expérimentaux ont tous leurs propres avantages et limites. Les conditions d'essai et méthodes d'évaluation des données varient selon les laboratoires.
- Les données obtenues dans différents laboratoires et installations sur la fragilisation de gainages en Zr, dans des conditions similaires, sont habituellement comparables. Par conséquent, les différences de méthodologies d'essai ne paraissent pas primordiales. Cependant, on doit tenir compte de l'impact des conditions particulières d'essai – refroidissement lent ou trempe, par exemple – quand on veut déduire de ces données des conclusions concernant les critères APRP.
- Les critères APRP sont établis à partir d'hypothèses conservatives qui varient selon les pays et nécessitent une interprétation spécifique des données expérimentales.

1. Contexte

L'accident hypothétique de perte de réfrigérant primaire (APRP) est l'un des accidents de dimensionnement considérés lors de la conception des réacteurs à eau ordinaire. Il correspond à la dépressurisation brutale du circuit primaire du réacteur due à une brèche. On suppose que le réacteur est automatiquement arrêté mais que la température du cœur continue d'augmenter en raison de la chaleur résiduelle du combustible et de la perte de réfrigérant. À l'époque où cet événement a été classé parmi les accidents de dimensionnement, il était généralement admis qu'il fallait empêcher la fusion du cœur et toute dispersion excessive de combustible afin de limiter le plus possible les conséquences radiologiques pour les populations. Il a donc été imposé de concevoir un circuit de refroidissement de secours du cœur qui garantisse un refroidissement suffisant du combustible pendant toutes les phases de l'accident de dimensionnement.

Pendant un APRP, les gaines peuvent être portées à des températures de plus de 1 000 °C et réagissent avec le réfrigérant. Lorsque la température avoisine 800 °C, la phase α du zirconium commence à se transformer en phase β . En même temps, l'oxygène dissous dans le métal stabilise la phase α , ce qui entraîne la formation d'une couche α à forte teneur en oxygène entre la phase β et la couche d'oxyde. L'oxyde est très fragile, tout comme la phase α du métal sous-jacent, fragilisée par l'oxygène. Très oxydé, le gainage peut donc se rompre lors du brusque refroidissement du crayon combustible provoqué par la trempe. C'est pour cette raison qu'il est impératif de limiter la croissance de la phase α stabilisée par l'oxygène et de la couche d'oxyde ainsi que la diffusion de l'oxygène dans la phase β . Cette limite permet de s'assurer que la couche ex- β , qui doit résister au chargement, est suffisamment épaisse et peu chargée en oxygène pour préserver l'intégrité structurale du crayon combustible quand celui-ci sera soumis à la trempe et à différents types de contraintes.

En 1971, l'*United States Atomic Energy Commission* (USAEC) a défini des critères d'acceptation du circuit de refroidissement de secours du cœur, fondés sur le principe selon lequel « le transitoire de température de la gaine s'achève quand la géométrie du cœur est encore refroidissable et que la gaine n'a pas encore atteint le niveau de fragilisation à partir duquel elle risque de rompre pendant ou après la trempe » [2]. En 1973, ces critères ont fait l'objet d'une procédure réglementaire officielle (*rulemaking hearing*), abondamment documentée dans le *Journal of Nuclear Safety* en 1974 [3, 4].

À cette époque, il était acquis que les gaines en alliage de zirconium sont fragilisées par la diffusion de l'oxygène dans le métal sous-jacent de la couche d'oxyde plutôt que par la couche d'oxyde elle-même formée en surface. Autrement

dit, si l'oxydation totale est le meilleur moyen de mesurer la quantité de chaleur produite par la réaction entre l'eau et le zirconium métallique (et donc l'échauffement du cœur), c'est néanmoins la petite fraction d'atomes d'oxygène dissous dans la phase β résiduelle du zirconium qui détermine l'intégrité structurale du gainage. Pour plus de simplicité et faute d'une meilleure méthode de calcul de la distribution de l'oxygène dans les différentes couches métalliques, l'USAEC avait donc stipulé dans sa réglementation que le temps de formation de 17 % d'*equivalent cladding reacted* (ECR)¹ – calculé avec la corrélation de Baker-Just – serait utilisé comme mesure de substitution du temps de diffusion dans le métal sous-jacent d'une quantité d'oxygène suffisante pour fragiliser le zirconium. De surcroît, l'USAEC avait imposé que la température maximale de la gaine ne dépasse pas 1 204 °C. Les autres pays ont essentiellement repris ces critères dans leurs réglementations, même si certains, se fondant sur leurs propres données et d'autres considérations spécifiques, ont choisi des limites un peu différentes.

Avec l'emploi de plus en plus fréquent de combustibles à haut taux de combustion et de nouveaux alliages pour les gainages, il a été jugé utile d'engager une réflexion au niveau international sur les méthodologies d'essai de fragilisation des gaines dans les conditions d'un APRP et les critères d'acceptation correspondants. Les pays membres de l'AEN ont adopté diverses méthodologies pour établir leurs critères APRP. L'objectif du présent avis technique est d'examiner les différentes méthodologies d'essai et bases de calcul des critères APRP et de transmettre à la communauté internationale des recommandations sur la manière d'appliquer les résultats fournis par ces méthodologies.

1. Proportion de l'épaisseur de la gaine qui est oxydée en supposant que tout l'oxygène absorbé sert à la formation de ZrO_2 stœchiométrique.

2. Méthodologies d'essai existantes

Afin de démontrer la sûreté des combustibles, on a procédé à des essais de trempe semi-intégraux, de trempe sans chargement mécanique, de compression d'anneaux, de flexion et d'impact pour évaluer l'intégrité structurale et la fragilisation des gaines. La note technique du WGFS intitulée « Technical Note on LOCA Fuel Cladding Test Methodologies – Compilation of Responses and Recommended Test Characteristics » [5] contient des descriptions détaillées de ces essais.

2.1. Essais de trempe

2.1.1. Essais de trempe semi-intégral

L'essai de trempe semi-intégral consiste à exposer des court tronçons de crayons (de 200 à 600 mm de long), fabriqués avec des tubes de gainage et des pastilles d' UO_2 (ou des pastilles postiches), à de la vapeur à haute température puis à leur faire subir une trempe finale en eau [6-10]. Les crayons gonflent et se rompent pendant l'échauffement puis subissent une oxydation isotherme à des températures prédéterminées pendant différentes durées.

En réacteur, les crayons combustibles chauds et les tubes-guides plus froids sont soumis à différents niveaux de dilatation/contraction axiale. Comme d'autres phénomènes, notamment le ballonnement des crayons et les interactions chimiques entre les crayons et les grilles, peuvent limiter leur déplacement axial dans les grilles, ces crayons peuvent être soumis à une contrainte axiale, d'autant plus forte dans les assemblages où les tubes-guides sont mécaniquement fixés aux grilles. Pendant le renoyage, les crayons combustibles subissent non seulement des chocs thermiques et des chargements hydrauliques complexes, mais aussi une force de traction axiale due à cette contrainte. C'est pour cette raison qu'il est souvent prévu dans les essais semi-intégraux de procéder au refroidissement et à la trempe des crayons sous contrainte. Dans un crayon combustible à haut taux de combustion, le collage pastille-gaine peut être si fort qu'il limite la contraction axiale, bien que ce collage soit susceptible de disparaître pendant l'APRP. Le chargement mécanique pendant et après la trempe est jugé complexe dans la géométrie d'un assemblage, de sorte qu'il est difficile d'en évaluer les caractéristiques et l'amplitude. Par exemple, on ne tient pas compte dans les essais décrits ci-dessus d'une éventuelle contrainte radiale suggérée par les essais en pile [11, 12].

Si la gaine est fragilisée par l'oxydation et l'hydruration secondaire, elle peut se rompre pendant la trempe. Sa rupture dépend généralement du niveau d'oxydation et du chargement mécanique. Les résultats sont généralement exprimés sous forme graphique par des cartes représentant les conditions de rupture en fonction du taux d'oxydation et de la température d'oxydation (ou de la quantité d'hydrogène préexistante dans le cas d'une gaine de combustible HTC).

2.1.2. Essais de trempe sans chargement mécanique

Les experts ne sont pas d'accord sur l'amplitude des blocages crayon-grille que peuvent causer les interactions chimiques (eutectiques). De plus, si les crayons ne gonflent pas à l'intérieur des grilles (les ailettes des grilles refroidissent localement les crayons), les interactions crayon-grille seront très faibles, et la contrainte axiale appliquée au crayon est négligeable [13, 14]. De ce point de vue, les principaux chargements subis par le crayon pendant la trempe seront essentiellement les chocs thermiques et les chargements hydrauliques provoqués par la trempe. L'essai de trempe sans chargement mécanique réalisé en France [15] pourrait être utile pour étudier la tenue des crayons au choc thermique. Dans cet essai, on expose de courts tronçons de gaine (non irradiée et pré-hydrurée) à une oxydation double-face en vapeur puis on leur fait subir une trempe en les plongeant directement dans l'eau froide. On peut alors déterminer des limites sur le taux d'oxydation (ECR) mesuré correspondant à la fragmentation de la gaine sous l'effet des contraintes thermiques pendant la trempe ou correspondant à la perte d'étanchéité (première microfissure repérée dans la gaine après la trempe par une méthode de détection de fuite à l'hélium). Le ballonnement et la rupture des échantillons n'étaient pas simulés dans ces essais français. C'est pourquoi, on a pré-hydruré les gaines jusqu'à 5 000 ppm pour pouvoir y étudier l'effet de l'hydruration secondaire [15].

2.2. Essais post-trempe

2.2.1. Essais de compression d'anneaux

L'essai de compression d'anneaux est un essai de ductilité standard destiné à tester les matériaux susceptibles d'une transition ductile-fragile. Il n'est pas conçu pour simuler des conditions de chargement particulières. Les résultats d'essais de compression d'anneaux ont été utilisés en 1973 pour définir les limites de température (température maximale, PCT) et du taux d'oxydation (ECR) garantissant la ductilité post-trempe de la gaine.

Cependant, les méthodes appliquées par Hobson [16, 17] pour déterminer les niveaux et températures d'oxydation correspondant à la transition ductile-fragile étaient rudimentaires. Les anneaux étaient comprimés jusqu'à rupture complète – souvent associée à quatre fissures dont les positions étaient repérées par rapport au plateau de chargement. Puis on réassemblait les fragments. Si on obtenait une forme circulaire et non ovale, l'anneau était qualifié fragile. On procédait ensuite à une observation au microscope du faciès de rupture. Les courbes charge-déplacement correspondant à ces essais ont été utilisées, avec les résultats des observations macroscopiques et microscopiques, pour définir la ductilité nulle, mais

ces courbes n'ont jamais été publiées, bien qu'elles aient été prises en compte au cours de la procédure réglementaire américaine de 1973.

Lors de travaux plus récents effectués à l'Argonne National Laboratory (ANL) [18], des anneaux placés sur un banc d'essai ont été comprimés à vitesse lente. La première baisse importante de la charge correspond à la formation d'une fissure longitudinale traversante. Un paramètre caractéristique, l'*offset displacement* est obtenu en effectuant une décharge hypothétique depuis la charge maximum avant la chute de charge en utilisant la pente de la région élastique des courbes charge-déplacement. Cet *offset displacement* est ensuite normalisé en le rapportant au diamètre externe de la gaine avant essai pour obtenir la déformation plastique relative (*offset strain*). Quand les échantillons sont oxydés, il n'est pas possible d'effectuer le déchargement contrôlé juste avant la rupture car le déplacement auquel la rupture se produit n'est pas connu a priori, et l'*offset strain* est surestimée. Par conséquent, on a, par hypothèse fixé à l'*offset strain* une limite de 2 % pour déterminer la transition ductile-fragile, les échantillons étant considérés ductiles quand l'*offset strain* est supérieure ou égale à 2 %. Si l'*offset strain* est inférieure à 2 % à la rupture, on ignore si les échantillons sont ductiles ou fragiles. C'est pourquoi, pour cette série d'essais (ANL), il a été proposé un critère complémentaire, une limite à 1 % de la déformation permanente, avec la procédure correspondante, afin de déterminer si ces derniers échantillons sont ductiles ou fragiles.

Remarquons également que la limite de 17 % ECR a été calculée sur la base de données sur la ductilité nulle tirées d'essais de compression lente uniquement (c'est-à-dire apparemment sans tenir compte de données similaires fournies par des essais de compression d'anneaux à grande vitesse de déformation ou de type « essai d'impact »). Cette exclusion n'a pas été évoquée au cours de la procédure réglementaire américaine de 1973.

Il ne semble pas exister de définition précise de la mesure de la ductilité résiduelle à utiliser lors des essais de compression d'anneaux. En général, la ductilité résiduelle décroît rapidement dans un intervalle relativement étroit de variation de l'ECR, et l'ECR critique peut être déduit par extrapolation de la chute de ductilité à la limite de 2 % de l'*offset strain* ou à la limite de 1 % de la déformation permanente [18, 19]. Une autre définition de la transition ductile-fragile a été proposée, qui repose sur l'énergie de déformation dissipée pendant l'essai de compression jusqu'à la formation de la première fissure traversante, calculée par mm de longueur de l'échantillon [20]. En République tchèque, des chercheurs ont établi un critère empirique supplémentaire (« critère K ») [21-23].

2.2.2. Essais de flexion

Chung [6] et Uetsuka [7] ont examiné des échantillons soumis à des essais de compression d'anneaux, prélevés dans la zone de ballonnement de gaines rompues et oxydées. Ces observations ont clairement montré la présence de zones fragilisées au niveau et à proximité du ballon. On a donc besoin d'un essai adapté à l'étude du comportement mécanique post-trempe de crayons combustibles ballonnés. Un petit nombre d'essais de flexion ont été réalisés à l'ANL [18], et l'USNRC prévoit des essais de flexion supplémentaires à l'ANL et dans les laboratoires de Studsvik.

L'essai de flexion de tube pourrait aider à confirmer les critères de fragilisation. Le gainage est soumis à une contrainte axiale, une situation de chargement sans doute plus proche de la réalité des chargements en jeu pendant un APRP – interactions crayon-grille, vibrations sous écoulement ou accélérations sismiques. Au cours d'un essai de flexion, la distribution de la contrainte est théoriquement uniforme sur toute l'épaisseur de l'échantillon tandis que son amplitude et son signe varient le long de la circonférence :

- Dans le cas d'un essai de flexion 3 points, l'emplacement de la rupture doit coïncider avec le point d'application de la charge. À cause de ce biais concernant le point de rupture, cet essai présente un intérêt limité quand on s'intéresse au comportement de la zone ballonnée, mais reste tout à fait adapté à l'étude du comportement du reste du gainage [24, 25].
- Dans le cas d'un essai de flexion 4 points, on applique un moment de flexion constant entre les deux appuis internes. Ce type d'essai, sur des gaines remplies de pastilles combustibles, est le moyen le plus représentatif d'étudier le comportement de la zone ballonnée d'un crayon combustible. L'échantillon peut se rompre en son point le plus fragile, qui se trouve généralement dans la zone d'éclatement, au voisinage du col du ballon, ou en tout point de la zone ballonnée, selon l'épaisseur et selon la teneur en oxygène et en hydrogène de l'échantillon après la trempe.

L'intégration des résultats des essais de flexion à l'analyse réglementaire suppose une certaine connaissance des chargements représentatifs d'un APRP. En considérant les résultats des essais de flexion, il ne faut pas oublier que l'emplacement et l'énergie de rupture dépendent fortement de l'orientation des chargements de flexion par rapport à l'ouverture à l'éclatement. L'énergie de rupture est la plus faible si, pendant l'essai de flexion 4 points, l'ouverture à l'éclatement est en tension. Comme dans le cas de l'essai de compression d'anneaux, il peut être approprié d'utiliser l'essai de flexion pour déterminer la transition ductile-fragile plutôt que l'énergie de rupture minimale si l'on connaît mal les chargements typiques d'un APRP. Rappelons enfin que l'essai de flexion est de loin le plus coûteux puisqu'il nécessite la plus grande longueur de gaine. Cependant, il a pour net avantage de permettre l'étude d'échantillons comprenant la zone de ballonnement.

2.2.3. Essais d'impact

Au début des années 80, Chung et Kassner ont réalisé de nombreux essais d'impact à l'ANL dans le cadre d'un programme d'étude de la tenue à un chargement post-trempe de gainages oxydés [6]. La plupart des échantillons ont résisté à la trempe, même à des niveaux d'oxydation élevés, ce qui a conduit à déterminer la marge existante par rapport à la rupture. Les résultats de ces essais ont été pris en compte lors de la révision des bases de calcul des critères de fragilisation au cours de la procédure réglementaire américaine de 1988, mais les limites d'origine n'ont pas été modifiées.

Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) a également mené des essais d'impact [26, 27]. Les résultats ont été comparés à ceux des essais de flexion 3 points et des essais de compression d'anneaux.

La réalisation d'essais d'impact peut également se justifier par les conditions d'un APRP. En effet, certains des chargements auxquels on s'intéresse peuvent être assimilés à des impacts, par exemple les chocs entre crayons dans les zones de ballonnement pendant la trempe ou les manipulations post-trempe.

L'essai d'impact peut être considéré comme un essai de flexion 3 points à grande vitesse de déformation, sachant que la rupture se produira plutôt au point d'impact. Cependant, cela n'a pourtant pas beaucoup d'importance pour l'évaluation du comportement mécanique dans une région oxydée de façon homogène (hors du ballon). Contrairement à un essai de flexion, un essai d'impact peut être réalisé plusieurs fois sur la même éprouvette, si cette dernière résiste à l'impact à l'énergie choisie. L'essai d'impact permet aussi de tester les différentes parties d'un échantillon indépendamment les uns des autres, comme l'ont fait Chung et Kassner [6].

2.2.4. Essais de traction d'anneaux

L'essai de traction d'anneaux est presque aussi simple à réaliser qu'un essai de compression d'anneaux. On utilise souvent cette technique pour évaluer la relation entre contrainte et déformation dans la direction circonférentielle de la gaine. La principale différence entre les essais de compression et de traction tient à la distribution de contrainte sur l'épaisseur de la paroi des échantillons. Dans le premier cas, on observe une contrainte de flexion qui passe de la compression à la traction. Dans le second cas, on obtient une contrainte de traction relativement uniforme, même si, en début d'essai, on observe une contrainte de flexion du fait de l'allongement de l'anneau. Les valeurs absolues des courbes charge-déplacement enregistrées pendant les essais de traction, de compression ou de flexion sont différentes puisque les conditions de chargement et la géométrie le sont. Toutefois, les seuils de transition ductile-fragile qu'on déduit de ces essais doivent rester proches puisque la perte de ductilité, qui caractérise l'état de la gaine après l'oxydation, ne dépend pas de la méthode d'essai.

2.3. Essais intégraux en pile

Les essais intégraux en pile, menés notamment dans l'installation PBF (*power burst facility*) ou dans les réacteurs PHEBUS et Halden [28], permettent de simuler des conditions plus proches de la réalité des réacteurs, impossibles à reproduire dans le cadre d'essais hors pile (irradiation du crayon combustible, production d'énergie par fission à l'intérieur d'une pastille d' UO_2 ou relocalisation des fragments de pastilles combustibles dans la zone de ballonnement). Néanmoins, les conditions d'essai ne permettent pas toujours d'exploiter directement les résultats expérimentaux pour représenter les conditions d'un APRP. En particulier, beaucoup d'essais d'APRP effectués en pile, à l'exception de ceux réalisés sur PHEBUS [11, 12], portent sur un seul crayon combustible (avec pour conséquence une accentuation du phénomène de ballonnement et une moindre représentativité de la phase d'oxydation à haute température) et ne comportent pas de phase de dépressurisation et/ou de trempe. Par conséquent, pour que la transposition des conditions d'essais en pile aux conditions en réacteur soit fiable, il importe d'instrumenter ces essais intégraux en pile puis d'analyser et d'interpréter leurs résultats de façon correcte et avec des codes validés [11, 12, 29].

3. Principaux résultats obtenus par les différentes méthodologies

3.1. Essais de trempe

Les essais de trempe semi-intégraux ont été réalisés dans les années 80 sur des gaines non irradiées à l'ANL et dans les laboratoires de l'Agence japonaise de l'énergie nucléaire (JAEA, auparavant JAERI) [6, 9]. Dans des conditions sans contrainte, le seuil de rupture a été enregistré entre 38 et 40 % ECR. Ces résultats concordent avec ceux des essais de trempe sans chargement mécanique menés en France [15], sauf dans le cas des gainages pré-hydrurés à de très fortes concentrations (2 000 à 5 000 ppm H) qui présentent un seuil de rupture à 20 % ECR pour une trempe directe depuis la température d'oxydation. JAEA a également effectué des essais sous contrainte et constaté que, dans ce cas, le seuil de rupture décroît jusqu'à environ 20 % ECR avec des échantillons axialement bloqués lors du refroidissement.

Compte tenu de l'intérêt manifesté récemment pour les hauts taux de combustion, on a également entrepris d'étudier l'effet de l'hydrogène sur le seuil de rupture, car l'hydruration a un effet déterminant sur la ductilité du gainage en général [30]. Les résultats de la JAEA indiquent que l'ECR correspondant au seuil de rupture décroît quand la concentration initiale d'hydrogène et la contrainte axiale augmentent, mais qu'il reste suffisamment au-dessus de la limite de 17 % même si la contrainte appliquée avoisine 540 N. Les essais de trempe ont été menés sur de nouveaux alliages employés comme matériaux de gainage tels que le M5® et le HANA. Le type d'alliage semble n'avoir aucun effet manifeste sur les conditions de rupture [31, 32].

Plus récemment, JAEA a réalisé des essais de trempe semi-intégraux sur des gainages de combustibles à haut taux de combustion (66-77 GWj/t, < 840 ppm d'hydrogène) dans les mêmes conditions de contrainte axiale [33]. Les alliages étudiés étaient le MDA, le ZIRLO, le M5, le NDA et le Zircaloy-2. Les échantillons ont été oxydés à des températures comprises entre 1 190 et 1 210 °C jusqu'à des niveaux situés entre 18 et 38 % ECR-BJ² (entre 13 et 28 % ECR-CP³). Les résultats montrent que les effets des hauts taux de combustion ne sont pas significatifs en termes d'oxydation, de ballonnement et de comportement à rupture. Le seuil de rupture ne

-
2. ECR calculé avec la corrélation de Baker-Just.
 3. ECR calculé avec la corrélation de Cathcart-Powel.

diminue pas de façon significative à de hauts taux de combustion, et pour de nouveaux alliages, dans l'intervalle de taux combustion considéré. Toutefois, il peut être légèrement inférieur quand le gainage est hydruré lors du fonctionnement du réacteur, comme on a pu l'observer sur une gaine en Zircaloy-4 non irradiée pré-hydrurée avec la même quantité d'hydrogène. Autrement dit, dans les conditions d'essai, le seuil de rupture des gaines de combustibles à haut taux de combustion est supérieur à la limite fixée par les critères d'acceptation japonais pour les APRP (15 % ECR) quand le taux de combustion ne dépasse pas 80 MWj/kg et/ou quand la concentration d'hydrogène ne dépasse pas 840 ppm.

3.2. Essais mécaniques post-trempe

3.2.1. Essais de compression d'anneaux

L'ANL a récemment effectué des essais de compression sur des échantillons de gainages oxydés, irradiés ou non-irradiés, obtenus après découpage de crayons combustibles à haut taux de combustion (63–70 MWj/kg) [18]. D'après les résultats obtenus, l'hydrogène est l'effet de l'irradiation qui a le plus d'impact sur la fragilisation et le seuil de fragilisation (déformation permanente < 2 %, voir section 4) décroît quand la teneur en hydrogène augmente. Le degré de fragilisation dépend également des conditions de refroidissement. Par conséquent, dans les cas de gaines en Zircaloy-4 et ZIRLO de combustibles HTC à haute teneur en hydrogène (<700 ppm), les bornes des seuils de fragilisation post-APRP se situent à 8-9 % (sans trempe) et 5 % (avec trempe à 800 °C) ECR-CP, soit un niveau bien inférieur à l'actuel critère de sûreté américain. Dans le cas de gaines en M5 de combustibles HTC à plus faible teneur en hydrogène (<150 ppm), ces seuils se situent à 18 % (sans trempe) et 14 % (avec trempe à 800 °C) ECR-CP.

Les échantillons des différents alliages étudiés à l'ANL ont été testés avec les mêmes dispositifs, ce qui permet d'en comparer les performances. L'une des premières conclusions concerne le Zircaloy-4 (Zr-1.4 % Sn) non-irradié. Son seuil de fragilisation n'est pas exactement de 17 % comme défini dans la réglementation américaine : les seuils mesurés sur trois éprouvettes de Zircaloy-4 de trois fabrications différentes sont compris entre 15,6 et 19 %. Des seuils très différents ont également été obtenus lors d'autres essais portant sur les alliages M5 et E110 qui ont la même composition nominale (Zr-1 % Nb). Enfin, les essais sur du Zircaloy-2 et du ZIRLO ont produit des seuils de fragilisation (19 %) très comparables à ceux des autres matériaux de gainage modernes fabriqués par des procédés similaires. Par conséquent, le seuil de fragilisation varierait plus en fonction de la technique de fabrication que de la composition spécifique de l'alliage.

Au CEA, des essais de compression d'anneaux ont été effectués, avec les analyses détaillées correspondantes, afin de comparer la baisse relative de la ductilité d'éprouvettes de Zircaloy-4 et de M5 oxydées et trempées. Les résultats ont permis d'étudier l'effet de l'hydrogène et le mécanisme de fragilisation post-trempe des alliages [24, 26]. De même, AEKI a réalisé ce type d'essai sur des gaines en E110 et Zircaloy-4 oxydées pour étudier la fragilisation de ces alliages [20,34].

3.2.2. Essais d'impact

En 1980, l'ANL a effectué des essais d'impact au mouton-pendule à 23 °C sur des tubes en Zircaloy-4 précédemment pressurisés, éclatés, oxydés, puis refroidis à ≈ 5 °C/s et ayant résisté au choc thermique de la trempe [6]. Les résultats des essais d'impact à 0.3 J montrent que la limite de 17 % ECR permet d'empêcher la rupture d'un gainage éclaté et oxydé lorsqu'il subit un impact de 0.3 J à 23 °C, sous réserve que la température maximale de la gaine soit restée inférieure ou égale à 1 204 °C. Ces résultats ont été représentés graphiquement sous la forme d'une carte de rupture fondée sur l'épaisseur de la couche de métal transformée contenant moins de 0.7 % massique d'oxygène en fonction de la teneur moyenne en hydrogène dans la zone locale soumise au choc. Sur la base de ce graphique, l'ANL a proposé de remplacer les deux critères « ECR < 17 % » et « température maximale de gaine $\leq 1\,204$ °C » par un critère unifié spécifiant que l'épaisseur de la couche de métal transformée contenant moins de 0.7 % massique d'oxygène doit être supérieure à 0.3 mm. Mais cette approche n'a finalement pas été retenue.

De son côté, le CEA a mené des essais d'impact sur des échantillons préalablement entaillés, oxydés sur une face puis trempés. L'analyse fractographique a montré que, dans les conditions appliquées et pour la géométrie considérée, le seuil de transition ductile-fragile se situait à 0.05 J/mm². De plus, le CEA a proposé un critère de fragilisation fondé sur les teneurs en oxygène et en hydrogène et les épaisseurs des couches ZrO₂, α (O) et ex- β . Toutefois, ce nouveau critère peut être considéré comme une amélioration du précédent critère de l'ANL qui stipule que « l'épaisseur de la couche ex- β contenant moins de 0.7 % massique d'oxygène doit être supérieure à 0.3 mm » [5].

4. Justification des bases de calcul des critères APRP

Les États-Unis et de nombreux autres pays ont fondé leurs critères sur les résultats des essais de compression d'anneaux. Le Japon et la Russie, qui s'étaient initialement appuyés sur des données et considérations similaires pour établir leurs critères, ont ensuite élargi leurs bases de calcul aux informations fournies par les essais de trempe semi-intégraux. On trouvera résumée ci-dessous la logique qui préside aux deux méthodologies. D'autres paramètres et méthodologies d'essai ont aussi été utilisés par le passé pour déterminer les seuils de fragilisation.

4.1. Justification des essais semi-intégraux

Après la définition, dans les années 70, de critères APRP principalement fondés sur les résultats d'essais de compression d'anneaux, d'autres travaux effectués pendant la décennie suivante ont permis de recueillir des données expérimentales sur le comportement du combustible dans les conditions d'un APRP. Ces essais ont principalement révélé l'hydruration secondaire que cause l'oxydation en peau interne du gainage, au voisinage de l'ouverture de la fissure [7]. Il a été montré que cette hydruration augmente la fragilisation du gainage oxydé. On a également constaté que la déformation du gainage causée par le ballonnement et la rupture a une influence essentielle sur la fragilisation des gaines. Il en a été déduit que l'évaluation de la fragilisation du gainage pendant un APRP devait tenir compte de la succession des phénomènes de ballonnement, de rupture, d'oxydation, d'hydruration secondaire et de choc thermique [9]. Si l'on considère que les facteurs déterminants sont le choc thermique et le chargement mécanique pendant la trempe, alors les essais de trempe intégraux (ou semi-intégraux) qui simulent la séquence d'événements caractéristique d'un APRP fournissent des informations capitales sur l'intégrité du gainage dans ces conditions.

Pour garantir la sûreté en cas d'APRP, on peut imposer des conditions qui permettent d'éviter une fragmentation importante des matériaux des crayons combustibles, qui nuirait à la refroidissabilité du cœur du réacteur. Cependant, il est difficile de quantifier ce que l'on entend par « fragmentation importante ». C'est pourquoi, on peut appliquer un seuil de rupture déterminé par des essais de trempe semi-intégraux pour s'assurer, avec une marge suffisante, que le cœur pourra être maintenu dans une géométrie refroidissable dans l'éventualité d'un APRP.

Si l'on pose comme hypothèse que le choc thermique est l'événement déterminant et que les autres chargements sont négligeables, on peut considérer le protocole d'essai de trempe consistant à détecter la perte d'étanchéité du gainage comme un moyen adapté de démontrer la refroidissabilité à long terme de la

géométrie du cœur par l'absence de toute fragmentation des crayons combustibles. Si cette hypothèse n'est pas valide, il convient de chercher d'autres méthodes d'essai qui soient moins dépendantes d'une compréhension fine des chargements mécaniques pendant l'APRP.

4.2. Justification des essais de compression d'anneaux

Au début des années 70, Hobson et Rittenhouse ont réalisé des essais de compression d'anneaux entre 23 et 150 °C sur des éprouvettes en Zircaloy-4 soumises à une oxydation double-face en vapeur à 927-1 315 °C puis à une trempe directe à l'eau froide. Hobson et Rittenhouse ont estimé le seuil de fragilisation (ductilité nulle) en utilisant comme indicateur la proportion de couche β dans l'épaisseur de la paroi de la gaine oxydée. Le critère de 17 % ECR se fonde principalement sur les résultats de leurs essais de ductilité post-trempe et, dans une moindre mesure, sur d'autres données, dont les résultats d'essais de trempe menés par Hesson *et al.* [36] et d'essais de compression d'anneaux après oxydation simple-face, effectués par combustion engineering.

Les chercheurs de l'USAEC étaient d'avis que les contraintes dues à la trempe devaient constituer les chargements principaux mais que les données recueillies jusqu'alors n'étaient pas suffisamment probantes pour qu'on puisse exclure tous les autres chargements. Ils pensaient, par ailleurs, qu'il ne serait peut-être pas possible de prévoir et de calculer la totalité des contraintes supportées par les crayons combustibles pendant et après un APRP. De ce fait, ils en vinrent à considérer le maintien de la ductilité comme la meilleure garantie de résistance à la fragmentation sous différents types de chargements (choc thermique, contraintes d'assemblage, forces hydrauliques, chocs entre crayons et manutention). C'est la raison pour laquelle ils choisirent les résultats des essais de compression d'anneaux comme principale base de calcul des critères de sûreté.

Les résultats des essais de trempe sans contrainte étaient jugés utiles pour confirmer et rassurer uniquement. Au cours de la procédure réglementaire de 1973, l'USAEC a écrit que « les contraintes d'assemblage et les interactions entre crayons peuvent ne pas être beaucoup plus faibles que le chargement dû au choc thermique et, par conséquent, ne doivent pas être négligées ». C'est sans doute parce qu'on manquait de données sur les niveaux de chargement et les conditions de rupture qu'il a été décidé, à cette époque, de ne pas accepter les résultats des essais de trempe comme base des critères de sûreté réglementaires.

5. Comparaison et discussion

5.1. Étude comparative des essais de compression d'anneaux et de trempes semi-intégraux

Quand on compare les résultats d'essais de compression d'anneaux et d'essais de trempes semi-intégraux, il importe de bien tenir compte des points suivants :

- Les deux méthodologies fondent leur évaluation du processus de fragilisation des gaines de Zr en vapeur à haute température sur l'observation de mécanismes différents :
 - Les échantillons soumis à des essais de compression d'anneaux sont généralement oxydés en vapeur (comme ceux des essais intégraux).
 - Les essais de trempes semi-intégraux peuvent représenter de façon plus satisfaisante le comportement d'un crayon combustible pendant un APRP y compris les phénomènes de ballonnement du gainage et d'hydruration secondaire en face interne du gainage après éclatement.
- Les deux méthodologies donnent des informations sur des phénomènes relativement différents à des niveaux de fragilisation qui diffèrent également :
 - Les essais de compression d'anneaux permettent de déterminer la transition ductile-fragile (ductilité nulle ou seuil de fragilisation). Cette transition peut être déduite des courbes charge/déplacement, et les conditions d'essai sont très reproductibles.
 - Les essais de trempes semi-intégraux avec chargement mécanique sont en quelque sorte des tests de la résistance du gainage oxydé à la contrainte axiale causée par le choc thermique et les autres chargements mécaniques. Le chargement radial qui pourrait s'appliquer compte tenu de la géométrie de l'assemblage n'est pas actuellement pris en compte. La rupture de la gaine fragilisée peut être plus difficilement reproductible.

Tableau 1. Étude comparative des essais de compression d'anneaux et des essais de trempe semi-intégraux

	Essai de compression	Essai semi-intégral
Fragilisation due à l'oxydation à haute température du Zr	Oui	Oui
Effets de la corrosion et de l'hydruration en service	Oui	Oui
Prise en compte de la zone ballonnée	Non*	Oui
Effet de l'hydruration secondaire	Non*	Oui
Détermination de la transition ductile-fragile du gainage de Zr	Oui (essai de ductilité)	Non
Observation des conditions de rupture du crayon combustible (examen de la tenue à la contrainte axiale)	Non	Oui (essai de résistance)

* On peut adapter l'essai pour étudier ce facteur, mais la méthode n'a jamais été appliquée dans la démonstration de la sûreté.

Qui plus est, les protocoles des essais de compression d'anneaux et de trempe semi-intégraux peuvent ne pas être les mêmes dans tous les laboratoires et pour toutes les séries d'essais. Les résultats obtenus risquent donc d'être différents.

- Dans le cas des essais de compression d'anneaux, les résultats finals sont déterminés à la fois par la température d'oxydation et la température de l'essai de compression. La température d'essai a un impact important puisque, lorsqu'elle est plus élevée que la température ambiante, l'ECR de transition ductile-fragile augmente.
- Si l'échantillon de gaine subit une trempe à l'eau froide après avoir été oxydé (ce qui peut être le cas avec l'une ou l'autre des méthodes d'essai), sa structure interne ne se modifie pas. Au contraire, s'il est lentement refroidi, la diffusion de l'oxygène, de l'hydrogène et de certains éléments de l'alliage peut provoquer des évolutions structurales susceptibles à leur tour d'influer sur les conditions de la transition ductile-fragile. Plusieurs laboratoires ont étudié, en appliquant des protocoles d'essai différents, l'effet des conditions de refroidissement (vitesse de refroidissement et température de trempe) sur des échantillons hydrurés ou non [6, 27, 37, 38]. Les résultats ne sont pas toujours concordants. C'est pourquoi, il convient de poursuivre les investigations pour obtenir une vision plus claire de l'influence des conditions de refroidissement sur la perte de ductilité des gainages de combustibles HTC.
- La figure 1 illustre d'autres points à considérer dans la comparaison des données de l'ANL et du CEA. Insistons sur le fait que les protocoles d'essai du CEA et de l'ANL sont différents. D'une part, le premier réalise une oxydation simple-face et une montée en température très rapide jusqu'à 1 200 °C tandis que le second procède à une oxydation en double-face avec une montée en température plus lente qui simule mieux les conditions prévues en cas d'APRP. Or, comme nous l'avons expliqué dans les deux sections précédentes, il ne suffit pas de s'intéresser à l'ECR : la température d'oxydation contribue tout autant à la fragilisation de l'alliage. D'autre part, dans la majorité des essais du CEA, la trempe intervient à 1 200 °C tandis que l'ANL refroidit lentement les échantillons depuis 1 200 °C ou, parfois, procède à une trempe à 800 °C. Cependant, certains essais du CEA ont été effectués en procédant à un lent refroidissement avant la trempe [27, 38].

- Les conditions expérimentales des essais de trempe peuvent varier encore plus que celles des essais de compression d'anneaux. Les essais de trempe les plus simples peuvent être effectués sur des tubes de gainage vides ou des crayons combustibles ouverts aux extrémités, auquel cas la rupture ne se produit qu'à un niveau d'oxydation très élevé. Les caractéristiques du refroidissement et de la trempe ne sont pas les mêmes selon que la trempe intervient sur une ou deux faces ou que le gainage contient ou non des pastilles (postiches éventuellement). La simulation du ballonnement avant la trempe entraîne une hydruration secondaire de sorte que le matériau devient fragile à des niveaux d'oxydation encore inférieurs. Enfin, les essais de trempe peuvent être menés avec ou sans chargement (ou contrainte) supplémentaire et, bien sûr, plus les contraintes sont élevées, plus la rupture se produit à un niveau d'oxydation faible.
- La figure 2 dresse une liste comparative des différents paramètres d'essai.

Dans une étude récente [34], des chercheurs ont tenté de quantifier l'écart entre la transition ductile-fragile et les conditions de rupture pendant la trempe. Leurs résultats expérimentaux indiquent que l'énergie de déformation par unité de longueur est d'environ 50 J/m à la transition ductile-fragile tandis que la rupture fragile correspondant à une trempe interviendrait au-dessous de 1 J/m. D'autre part, la transition ductile-fragile du Zircaloy-4 peut être atteinte en 12 minutes à 1 000 °C dans des conditions isothermes tandis que la rupture observée pendant les essais intégraux sans contrainte est associée à une oxydation d'une durée de trois heures à température constante (figure 3). Sans hydruration secondaire, l'écart est donc très important.

Figure 1. Évolution des températures d'oxydation lors des essais de compression d'anneaux du CEA et de l'ANL

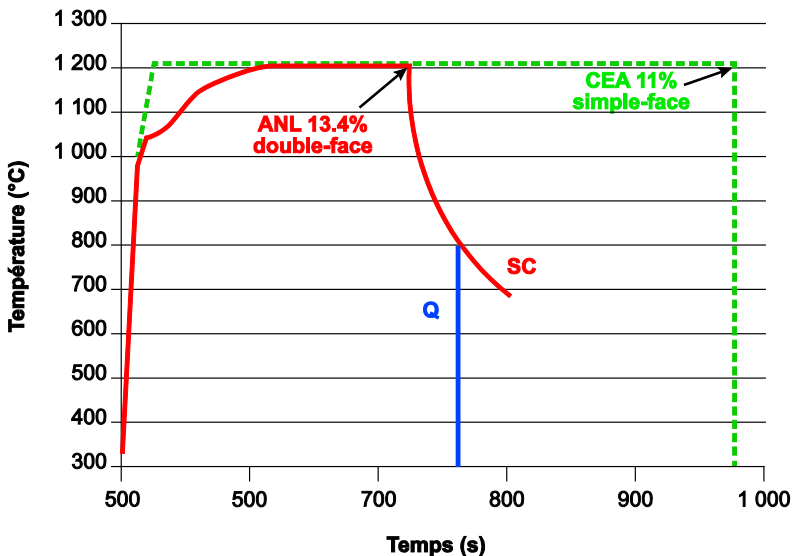
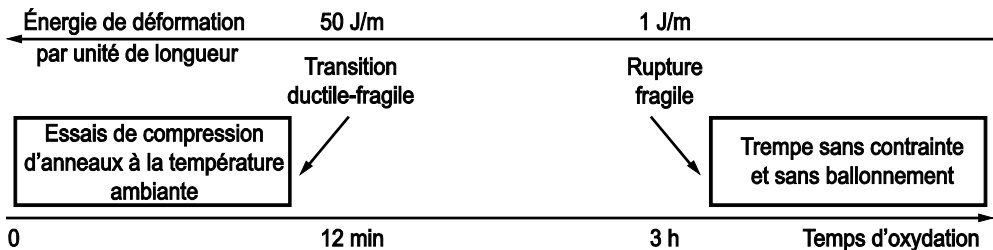


Figure 2. Comparaison des paramètres d'essai

Éprouvette pré-hydrurée	plus contraignant que	éprouvette neuve
Essai mécanique à température ambiante		essai mécanique à 135 °C
Essai sur la zone de ballonnement		essai sur gainage non déformé
Essai sous chargement		essai sans chargement

Figure 3. Temps d'oxydation d'un gainage en Zircaloy-4 à 1 000 °C jusqu'à la transition ductile-fragile et la rupture fragile pendant la trempe sans contrainte

Comme on l'a vu dans les sections 3.1 et 3.2.1, le comportement des gaines de combustibles à haut taux de combustion observé lors des essais intégraux japonais et des essais de compression d'anneaux américains est assez différent. Dans ces deux cas, la teneur en hydrogène était d'environ 700-800 ppm, ce qui peut avoir réduit la ductilité du gainage en zirconium.

Dans le cas des essais de compression d'anneaux, le temps d'oxydation nécessaire pour atteindre le seuil de fragilisation des gainages de combustibles HTC est plus court qu'avec des gainages vierges et l'ECR limite est très inférieur. Dans celui des essais intégraux, le gainage pré-hydruré doit atteindre un degré de fragilisation beaucoup plus important pour se rompre. La contribution de la pré-hydruration à l'état fragile final semble moins importante que lors des essais de compression, et les principaux effets sont l'oxydation, le ballonnement et l'hydruration secondaire. De ce fait, lors des essais intégraux, les gainages pré-hydrurés parviennent au niveau de fragilisation nécessaire à un ECR légèrement inférieur à celui qu'on mesure sur des gainages neufs.

Comme indiqué plus haut, les deux méthodes fournissent des informations sur des phénomènes différents à des degrés de fragilisation différents et dans des conditions expérimentales différentes. Cependant, on peut globalement conclure que la pré-hydruration a davantage d'impact sur la fragilisation du gainage lors des essais de compression d'anneaux.

5.2. Essais de flexion ou de compression d'anneaux

Comprimer un anneau crée des contraintes de flexion circonférentielles qui passent de la traction à la compression de part et d'autre de la gaine. D'autres méthodes d'essai utilisées pour déterminer la transition ductile-fragile utilisent des modes de chargement semblables (flexion axiale, par exemple) ou plus contraignants (tension axiale ou circonférentielle, par exemple). La France et la Russie ont toutes deux déterminé que les données de ductilité et de fragilisation obtenues lors des essais de flexion axiale sont comparables à celles que fournissent les essais de compression d'anneaux [24]. Il en ressort que si le gainage oxydé se fragilise dans la direction circonférentielle, il se fragilisera également dans la direction axiale, ce qui est prévisible puisque le degré de fragilisation de la phase ϵ est indépendant de la direction du chargement.

Des essais de flexion 4 points menés sur des gainages ballonnés pourraient combiner les principaux avantages des essais de compression d'anneaux et des essais semi-intégraux puisqu'ils peuvent simuler la fragilisation du zirconium due à l'oxydation et à l'hydruration secondaire (comme dans les essais semi-intégraux) et mettre en évidence la perte de ductilité dans la section la plus fragile du crayon combustible (comme dans les essais de compression d'anneaux).

6. Recommandations

6.1. Essais de trempe

Lors d'essais de trempe sans chargement mécanique, on peut étudier l'effet du choc thermique sur la gaine à différentes teneurs en hydrogène. Si la détermination du seuil repose sur la détection de la première fuite, on dispose d'une marge suffisante avant le seuil de rupture ou de fragmentation. Ce type d'essai représente une première approche pour évaluer la tenue à la trempe d'un gainage. Il ne tient compte que des contraintes thermiques.

Les essais de trempe semi-intégraux sous contrainte fournissent des données sur le comportement structural des crayons combustibles dans des conditions simulées d'un APRP et sur leur résistance à la rupture, le cas échéant, au point le plus fragile (par exemple, dans la zone d'éclatement ou à proximité des extrémités du ballon pendant les essais de JAEA au cours desquels l'hydruration secondaire produit de fortes concentrations d'hydrogène). Ce type d'essai simule la séquence d'un APRP jusqu'à la phase de trempe. En augmentant progressivement la durée d'oxydation à haute température, on peut directement déduire un critère de rupture. L'ajout d'une étape supplémentaire (chargement) peut être nécessaire pour évaluer l'intégrité post-trempe du gainage. Il convient de poursuivre ces travaux pour mieux appréhender les phénomènes de « collage pastille-gaine » et des vibrations sous écoulement. De même, pour établir les protocoles d'essai qui serviront à déterminer les limites de conception en fonction de l'APRP, il est nécessaire de mener de nouvelles investigations afin de définir le chargement approprié (ou un chargement conventionnel choisi par consensus) à appliquer aux crayons combustibles pendant ou après la trempe.

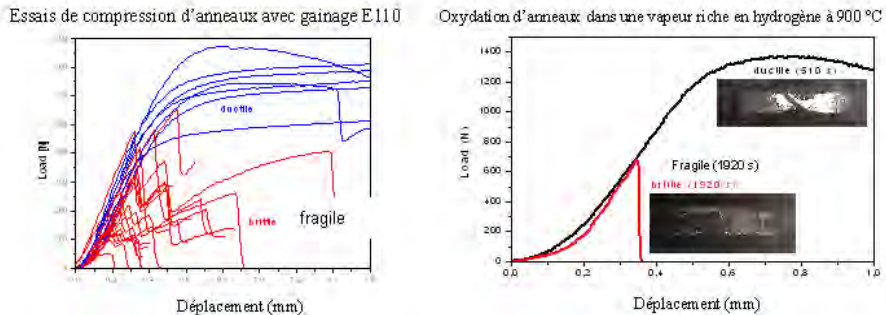
6.2. Essais de compression d'anneaux

L'essai de compression d'anneaux a l'avantage de nécessiter un échantillon de plus petite dimension, dont la préparation et le montage sur le banc d'essai sont plus simples. Toutefois, comme il ne porte que sur une courte longueur de gaine sans combustible, il s'agit d'une certaine manière d'une étude du comportement et des propriétés locales du matériau. Les contraintes appliquées pendant l'essai sont, elles aussi, localisées et peuvent être supérieures à celles qui se produisent pendant la trempe. L'objectif d'un tel essai mécanique est d'identifier le seuil en deçà duquel le gainage reste ductile et, ainsi, d'éviter les débats à propos des forces auxquelles le gainage doit résister pendant ou après un APRP.

Pour les essais de compression d'anneaux réalisés dans différents laboratoires, il importe que les expérimentateurs utilisent la même définition de la transition ductile-fragile. De plus, pour parvenir à un réel consensus sur le critère de fragilisation du gainage, il est nécessaire de recueillir plus de données et d'approfondir les procédures et les conditions d'essai, en particulier le profil de température d'oxydation, le type d'oxydation (simple-face ou double-face), la température d'essai (température ambiante ou 135 °C), le point de prélèvement de l'échantillon sur la gaine oxydée/rompue et le scénario de refroidissement (avec ou sans trempe).

La ductilité nulle (ou la transition ductile-fragile ou le seuil de fragilisation) pourrait être déterminée à l'aide des courbes charge-déplacement. Pour un matériau ductile, la courbe se caractérise par un plateau ductile après une phase élastique, l'absence de ce plateau signifiant que le matériau a atteint un certain degré de fragilisation (figure 4). Les courbes charge-déplacement tirées des essais de compression, de traction et de flexion sont de même type et peuvent toutes être utilisées. On peut déduire la ductilité nulle de la forme des courbes sans avoir besoin d'introduire des paramètres spécifiques tels que l'énergie de déformation ou l'offset strain qui sont calculés à partir de ces courbes.

Figure 4. Courbes charge-déplacement indiquant la transition ductile-fragile lors d'essais de compression (gauche) [39] et de traction (droite) [40]



6.3. Avis général

Deux types d'essais fondamentaux ont été proposés et sont utilisés dans les programmes de recherche sur l'APRP : des essais mécaniques fondés sur des mesures de la ductilité (essais de compression d'anneaux, de flexion 3 ou 4 points ou d'impact, par exemple) et des essais axés sur la résistance au choc thermique lors de la trempe d'un crayon combustible porté à haute température (avec ou sans chargement mécanique).

Les essais intégraux menés sur des crayons combustibles avec gainage en Zr montrent que la zone la plus fragile d'un gainage dans les conditions d'un APRP serait la zone ballonnée, plus précisément l'extrémité du ballon où se produit

l'hydruration secondaire. Les traditionnels essais de compression d'anneaux ne s'intéressent au comportement de la gaine en Zr qu'en dehors de la zone de ballonnement. Au contraire, les essais de trempe semi-intégraux effectués sur de courts crayons combustibles permettent de simuler non seulement le ballonnement mais aussi l'hydruration secondaire.

S'agissant des essais mécaniques, il importe de noter que, sur des matériaux de gainage identiques, les laboratoires parviennent à des conclusions assez proches, bien qu'ils utilisent différentes méthodes de mesure de la ductilité. Cependant, l'expérience révèle que les résultats des essais de ductilité sont très sensibles au mode de préparation des échantillons et au protocole d'essai. Les étapes de préparation peuvent inclure la sélection des échantillons en fonction de leur géométrie, un traitement de surface, une oxydation ou une corrosion initiale et une pré-hydruration.

Parallèlement, les paramètres tels que la durée et la température d'oxydation et la vitesse d'échauffement ou de refroidissement ont un impact substantiel sur la ductilité finale des échantillons. Les techniques employées pour les essais mécaniques des gainages oxydés et le traitement et la présentation des données sont une autre cause de désaccord possible entre les résultats des différents laboratoires. Par conséquent, pour bien comprendre, interpréter et/ou comparer ces résultats, il importe de connaître et, dans la mesure du possible, d'unifier ces paramètres.

De plus, on a vu que les paramètres d'essai (par exemple, trempe ou refroidissement lent depuis la température d'oxydation) peuvent influencer sur les résultats tout autant que la méthode d'essai elle-même.

Les critères de sûreté relatifs à l'APRP ont pour objectif principal d'éviter tout risque de rupture d'un crayon combustible qui serait susceptible de compromettre le refroidissement du cœur. Les conditions de rupture peuvent être tirées d'expériences effectuées par plusieurs méthodes, et les résultats des essais seront à interpréter en fonction du choix des paramètres expérimentaux, compte tenu du niveau de conservatisme souhaité.

7. Synthèse

L'objectif du présent avis technique est d'examiner les différentes méthodologies d'essai et bases de calcul des critères de sûreté relatifs à l'APRP et de transmettre à la communauté internationale des recommandations sur la manière d'appliquer les résultats de ces méthodologies à des fins réglementaires.

Pour évaluer la tenue à la trempe d'un gainage, une première approche consiste à réaliser un essai de trempe sans chargement mécanique, qui ne fait intervenir que les seules contraintes thermiques. On peut aussi effectuer un essai de trempe semi-intégral sous contrainte axiale pour obtenir des informations sur le comportement structural du crayon combustible dans les conditions d'un APRP et sur sa résistance à rupture éventuelle au point le plus fragile. Ce type d'essai simule la séquence d'événements typique d'un APRP jusqu'à la phase de trempe. En augmentant progressivement la durée d'oxydation à haute température, on peut directement déduire un critère de rupture. L'ajout d'une étape (chargement) peut être nécessaire pour évaluer l'intégrité post-trempe du gainage. Il convient de poursuivre ces travaux pour mieux appréhender les phénomènes de « collage pastille-gaine » et de vibrations sous écoulement. De même, pour établir les protocoles d'essai qui serviront à déterminer les limites de conception en fonction de l'APRP, il est nécessaire de mener de nouvelles investigations afin de définir le chargement à appliquer aux crayons combustibles pendant ou après la trempe.

L'essai de compression d'anneaux a l'avantage de nécessiter un échantillon de plus petite dimension, dont la préparation et le montage sur le banc d'essai sont plus simples. Toutefois, comme il ne porte que sur une courte longueur de gaine sans combustible, il s'agit d'une certaine manière d'une étude du comportement et des propriétés locales du matériau. Les contraintes appliquées pendant l'essai sont, elles aussi, localisées et peuvent être supérieures à celles qui se produisent pendant la trempe. L'objectif de cet essai mécanique est d'identifier le seuil en deçà duquel le gainage reste ductile et, ainsi, d'éviter les discussions concernant les forces auxquelles le gainage doit résister pendant ou après un APRP. Pour les essais de compression d'anneaux réalisés dans différents laboratoires, il importe que les expérimentateurs utilisent la même définition de la transition ductile-fragile. De plus, pour parvenir à un consensus clair sur le critère de fragilisation du gainage, il convient de recueillir davantage de données et d'examiner de façon plus approfondie les procédures et les conditions d'essai, en particulier la température d'oxydation, la température d'essai, le point de prélèvement de l'échantillon sur la gaine oxydée/rompue et le scénario de refroidissement.

Puisque les éprouvettes destinées aux essais de compression sont généralement prélevées dans une zone sans ballonnement, il est possible qu'elles ne fournissent

pas une représentation complète du comportement du gainage dans la zone ballonnée ni des autres phénomènes (hydruration secondaire, par exemple). Pour surmonter ce problème, on peut procéder à des essais de flexion. De ce point de vue, l'essai de flexion n'est qu'un autre moyen d'observer le comportement mécanique du gainage, mais en tenant compte de la zone de ballonnement. Comparés aux essais semi-intégraux ou de compression d'anneaux, des essais de flexion ont été rarement effectués pour étudier le comportement des zones ballonnées des gainages. De plus, les essais de flexion, comme les essais de compression, ne permettent pas de simuler les conditions de chargement spécifiques auxquelles on peut s'attendre pendant un APRP. Il importerait donc de réaliser davantage d'essais de flexion dans différents laboratoires pour déterminer dans quelle mesure ce type d'essai peut servir à établir les critères APRP.

Quand on compare les résultats d'essais de compression d'anneaux et d'essais semi-intégraux, il importe de bien tenir compte des points suivants :

- Les deux méthodologies fondent leur évaluation du processus de fragilisation des gaines de Zr en vapeur à haute température sur l'observation de mécanismes différents.
- Les deux méthodologies visent à fournir des informations sur des phénomènes relativement différents à des niveaux de fragilisation eux-mêmes différents.

Qui plus est, les protocoles des essais de compression d'anneaux et de trempes semi-intégraux peuvent varier avec les laboratoires et les séries d'essais et donner par conséquent des résultats très différents.

Le présent avis technique décrit et compare les avantages et les inconvénients des méthodologies d'essai existantes. Toutefois, il ne préconise pas de procédure normalisée pour définir les conditions expérimentales indispensables à l'établissement des critères de fragilisation, et ce pour plusieurs raisons :

- Les procédures et dispositifs expérimentaux ont tous leurs propres avantages et limites. Les conditions d'essai et d'évaluation des données varient selon les laboratoires.
- Les données obtenues dans différents laboratoires et installations sur la fragilisation, dans des conditions similaires, de gainages en Zr sont habituellement comparables. Par conséquent, les différences dans les méthodologies d'essai de fragilisation ne paraissent pas primordiales. Cependant, il convient de tenir compte de l'impact des conditions d'essai – refroidissement lent ou trempes, par exemple – au moment de tirer des conclusions des essais concernant les critères APRP.
- Les critères APRP sont établis à partir d'hypothèses conservatives qui varient selon les pays et nécessitent une interprétation spécifique des données expérimentales.

Références

1. "Review of High Burn-up RIA and LOCA criteria" [NEA/CSNI/R(2006)5].
2. "Interim Acceptance Criteria for Emergency-Core-Cooling Systems for Light-Water Power Reactors", *US Federal Register* 36 (125), 1971, pp. 12247-12250.
3. Cottrell, W.B. (1974), "ECCS Rulemaking Hearings", *Nuclear Safety*, 15, pp. 30-55.
4. "New Acceptance Criteria for Emergency Core-Cooling Systems of Light-Water-Cooled Nuclear Power Reactors", *Nuclear Safety*, 15 (1974), pp. 173-184.
5. "LOCA Fuel Cladding Test Methodologies, Compilation of Responses and Recommended Test Characteristics, Technical Note", Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, NEA/SEN/SIN/FUEL(2007)2, avril 2007.
6. Chung, H.M. et T.F. Kassner, "Embrittlement Criteria for Zircaloy Fuel Cladding Applicable to Accident Situations in Light-Water Reactors, Summary Report", NUREG/CR-1344 (ANL-79-48), janvier 1980.
7. Uetsuka, H. et al. (1981), "Zircaloy-4 Cladding Embrittlement due to Inner Surface Oxidation under Simulated Loss of Coolant Conditions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 18, pp. 705-717.
8. Furuta, T., H. Uetsuka et S. Kawasaki (1982), "Estimation of Conservatism of Present Embrittlement Criteria for Zircaloy Fuel Cladding under LOCA", *Zirconium in the Nuclear Industry: Sixth International Symposium*, Vancouver, Canada, ASTM STP 824, ASTM, pp. 734-746.
9. Uetsuka, H., T. Furuta et S. Kawasaki (1983), "Failure-Bearing Capability of Oxidized Zircaloy-4 Cladding under Simulated Loss-of-Coolant Conditions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 20, pp. 941-950.
10. Kim, J.H., M.H. Lee, B.K. Choi et Y.H. Jeong (2007), "Failure Behavior of Zircaloy-4 Cladding after Oxidation and Water Quench", *Journal of Nuclear Materials*, 362, pp. 36-45.
11. Hache, G. et H.M. Chung (2001), "The History of LOCA Embrittlement Criteria", NUREG/CP-0172, mai, pp. 205-237.
12. Grandjean, C. et G. Hache (2008), "A State-of-the-Art-Review of Past Programs Devoted to Fuel Behaviour under Loss-of-Coolant Conditions, Part 3, Cladding Oxidation, Resistance to Quench Loads and Post-quench Loads", DPAM/SEMCA-2008/093, juin.

13. Waeckel, N., P. Jacques, R. Yang et R. Montgomery (2001), "Analysis of Fuel Rod Axial Forces During LOCA Quench", OECD/NEA/CSNI Topical Meeting on LOCA Fuel Safety Criteria, Aix-en-Provence, 22-23 mars.
14. Waeckel, N., J.C. Brachet, V. Maillot, J.P. Mardon et A. Lesbros (2006), "High Burnup LOCA Limits: French Experimental Contribution and Perspectives", OECD/NEA/CSNI/SEGFSM LOCA Workshop, juin.
15. Grandjean, C., R. Cauvin et P. Jacques (1998), "Oxidation and Quenching Experiments with High Burnup Cladding under LOCA Conditions. Revision of Previous Data and Main Trends of Recent Tests", 26th Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, Maryland, États-Unis, 26-28 octobre.
16. Hobson, D.O. et P.L. Rittenhouse (1972), "Embrittlement of Zircaloy Clad Fuel Rods by Steam during LOCA Transients", Oak Ridge National Laboratory, ORNL-4758, janvier.
17. "Ductile-Brittle Behavior of Zircaloy Fuel Cladding" (1973), ANS Topical Meeting on Water Reactor Safety, Salt Lake City, mars.
18. Billone, M, Y. Yan, T. Burtseva et R. Daum (2008), "Cladding Embrittlement During Postulated Loss-of-Coolant Accidents", NUREG/CR-6967 (ANL-07/04), juillet.
19. Yegorova, L., K. Lioutov, N. Jouravkova, A. Konobeev, V. Smirnov, V. Chesanov et A. Goryachev (2005), NUREG/IA-0211, IRSN-194, NSI RRC KI 3188, US NRC, mars.
20. Hozer, Z., C. Györi, L. Matus et M. Horvath (2008), *Journal of Nuclear Materials*, 373, pp. 415-423.
21. Vrtíková, V., L. Novotný, R. Doucha et J. Veselý (1994), "An Approach to the Alternative LOCA Embrittlement Criterion", SEGFSM Top Meeting on LOCA Issues, Argonne National Laboratory, Argonne, 25-26 mai, États-Unis.
22. Tinka, I., V. Vrtílková et al. (2005), "Practical Illustration of the Traditional versus Alternative LOCA Embrittlement Criteria", conférence internationale "Nuclear Energy for New Europe", 5-8 septembre, Bled, Slovénie.
23. Vrtílková, V., L. Novotný, S. Štech et al. (2006), "Analysis of Revised 17% ECRC-P Criterion Using Oxidation Database UJP", The 7th plenary Meeting of SEG-FSM and Ad-Hoc Meeting on status of LOCA tests for burn-up dependent LOCA criteria, 27-28 juin, Paris, France.
24. Brachet, J.-C., J. Pelchat, D. Harmon, R. Maury, P. Jacques et J.-P. Mardon (2001), Proceedings of IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Behavior Under Transient and LOCA Conditions, 10-14 septembre, Halden, Norvège.
25. Brachet, J.-C. et al. (2004), "Overview of the CEA Data on the Influence of Hydrogen on the Metallurgical and Thermal-mechanical Behavior of Zircaloy-4 and M5TM Alloys under LOCA Conditions", Nuclear Safety Research Reference, 25-27 octobre, Washington D.C., États-Unis.

26. Portier, L. et al. (2004), "Influence of Long Service Exposures on the Thermal-mechanical Behavior of Zy-4 and M5 Alloys in LOCA Conditions", Zirconium in the Nuclear Industry: Fourteenth International Symposium, Stockholm, ASTM STP 1467.
27. Brachet, J., V. Vandenberghe-Maillot, L. Portier, D. Gilbon, A. Lesbros, N. Waeckel et J.P. Mardon (2008), "Hydrogen Content, Preoxidation, and Cooling Scenario Effects on Post-quench Microstructure and Mechanical Properties of Zircaloy-4 and M5® alloys in LOCA Conditions", *Journal of ASTM International*, 5-5, p. 28.
28. Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) (2009), "Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Conditions", NEA/CSNI/R(2009)15.
29. AEN (2010), "Safety Significance of Halden LOCA Test Results", NEA/CSNI/R(2010)5.
30. Nagase, F. et T. Fuketa (2005), "Behavior of Pre-hydrided Zircaloy-4 Cladding under Simulated LOCA Conditions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 42-2, pp.209-218.
31. Kim, J.H., M.H. Lee, B.K. Choi, J.H. Baek et Y.H. Jeong (2008), "Behavior of HANA-cladding after High Temperature Oxidation and Water Auench", 2008 Water Reactor Fuel Performance Meeting, 19-23 octobre, Séoul, République de Corée.
32. Nagase, F. (2009), "Recent Results of LOCA Study at JAEA", Fuel Safety Research Meeting 2009, mai, Tokai, Japon.
33. Nagase, F., T. Chuto et T. Fuketa (2009), "Behavior of High Burn-up Fuel Cladding under LOCA Conditions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 46-7, pp. 763-769.
34. Hózer, Z., T. Novotny, E. Perez Feró et M. Horváth (2008), "Failure and Ductile-to-Brittle Transition of Oxidized Zirconium, Proceedings of the 2008 Water Reactor Fuel Performance Conference", Séoul, République de Corée, papier 8018.
35. Hózer, Z. et al. (2001), "Effect of Hydrogen Content on the Embrittlement of Zr Alloys", IAEA Technical Committee Meeting on Fuel behaviour under Transient and LOCA Conditions, Halden, Norvège, AIEA, pp. 159-168.
36. Hesson, J.C. et al. (1970), "Laboratory Simulations of Cladding-steam Reactions Following Loss-of-coolant Accidents in Water-cooled Power Reactors", ANL-7609, Argonne National Laboratory, janvier.
37. Udagawa, Y., F. Nagase et T. Fuketa (2006), "Effect of Cooling History on Cladding Ductility under LOCA Conditions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 43-8, pp. 844-850.
38. Vandenberghe, V. et al. (2010), "Influence of the Cooling Scenario on the Post-quench Mechanical Properties of Pre-hydrided Zircaloy-4 Fuel Claddings after High Temperature Steam Oxidation (LOCA conditions)", 2010 LWR Fuel performance/TOPFUEL/WRFP, Floride, États-Unis, 26-29 septembre, papier 096.

39. Perez-Feró, E., Z. Hózer, P. Windberg, I. Nagy, A. Vimi, N. Vér, L. Matus, M. Kunstár, T. Novotny, M. Horváth et Cs. Győri (2007), "Behavior of Zr1%Nb Fuel Cladding under Accident Conditions", Proceedings of the 2007 International LWR Fuel Performance Meeting San Francisco, Californie, 30 septembre-3 octobre, papier 1018.
40. Perez-Feró, E., P. Windberg, Z. Hózer, M. Horváth, I. Nagy, A. Pintér-Csordás, E. Szabó, K. Kulacsy et Cs. Győri (2006), "Experimental Database of E110 Cladding Oxidised in Hydrogen Rich Steam", 2006 International Meeting on LRW Fuel Performance, Salamanque, Espagne, 22-26 octobre, Transactions, poster session II, pp. 112-116.

Liste des abréviations

AEKI	<i>Atomenergia Kutatóintézet</i> (Hongrie)
AEN	Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire
ANL	<i>Argonne National Laboratory</i> (États-Unis)
APRP	accident de perte de réfrigérant primaire
CEA	Commissariat à l'énergie atomique (France)
CRSC	circuit de refroidissement de secours du cœur
CSIN	Comité sur la sûreté des installations nucléaires
CSN	<i>Consejo de Seguridad Nuclear</i> (Espagne)
EGR	<i>equivalent cladding reacted</i>
EDF	Électricité de France
GRS	<i>Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit</i> (Allemagne)
HTC	haut taux de combustion
IFSN	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (Suisse)
IPS	Institut Paul Scherrer (Suisse)
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (France)
JAEA	<i>Japan Atomic Energy Agency</i> (Japon)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
REO	réacteur à eau ordinaire
UJV	<i>Ústav jaderného výzkumu</i> (République tchèque)
USAEC	<i>United States Atomic Energy Commission</i> (États-Unis)
USNRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i> (États-Unis)
VTT	<i>Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus</i> (Finlande)
WGFS	Groupe de travail sur la sûreté du combustible

PUBLICATIONS ET INFORMATIONS À L'AEN

Ouvrages imprimés

L'AEN publie une large sélection de rapports sur support papier, gratuits et payants. Le catalogue des publications est disponible en ligne sur le site www.oecd-nea.org/pub.

Site internet et produits électroniques

Outre une présentation de l'Agence et de son programme de travail, on trouvera sur le **site internet de l'AEN** des centaines de rapports téléchargeables gratuitement sur des questions techniques ou de politique.

Le **bulletin électronique mensuel de l'AEN** présente les derniers résultats, événements et publications de l'AEN. Abonnez-vous gratuitement au bulletin sur www.oecd-nea.org/bulletin/.

Consultez notre page **Facebook** sur www.facebook.com/OECDNuclearEnergyAgency.



Avis techniques du CSIN

N° 13

Les critères d'acceptation du circuit de refroidissement de secours du cœur définissent la température et le niveau d'oxydation à ne pas dépasser pour éviter la fragilisation excessive, et donc la rupture, des gaines de combustible, qui pourrait affecter le refroidissement du cœur dans le cas d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). Ces critères ont été établis principalement à partir de données expérimentales obtenues dans les années 1970 et 80. Plusieurs types d'essais ont été réalisés pour évaluer l'intégrité structurale et la fragilisation des gaines dans les conditions d'un APRP, et diverses méthodologies utilisées pour déterminer les seuils de fragilisation des gainages. Avec l'emploi de plus en plus fréquent de combustibles à haut taux de combustion et de nouveaux alliages pour les gainages, il a été jugé utile d'engager une réflexion au niveau international sur les méthodologies d'essai et les critères d'acceptation. Ainsi, le Comité de l'AEN sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) et son Groupe de travail sur la sûreté du combustible ont rédigé cet avis technique qui devrait intéresser tout particulièrement les autorités de sûreté, les exploitants de centrales nucléaires ainsi que les chercheurs travaillant sur le combustible nucléaire.