

Gestion du vieillissement

par A. Blahoianu, K. Gott, A. Huerta, N. Sekimura and A. Yamamoto*

La gestion du vieillissement est en général définie dans son acception la plus large, qui recouvre non seulement le vieillissement du matériel (structures, systèmes et composants), mais également certains aspects relevant plus spécifiquement de la gestion tels que le fait de se tenir informé des évolutions des technologies et des pratiques de gestion les plus récentes. À l'évidence, on accorde une très haute importance à la gestion « traditionnelle » du vieillissement, c'est-à-dire aux problèmes liés à la dégradation du matériel. Les autres aspects, tels que les évolutions de la technique ou de la gestion, bien que jugés importants, occupent dans les faits une moindre place.

La gestion du vieillissement des centrales comprend nécessairement les éléments suivants qui sont liés :

- compréhension et connaissance des mécanismes d'endommagement sous l'effet du vieillissement, dont des comparaisons des conséquences des mécanismes d'endommagement sur le comportement macroscopique des matériaux et des structures dans les conditions pertinentes ;
- modèles prédictifs pour extrapoler le comportement des structures, systèmes et composants jusqu'à une date définie ;

* M. Andrei Blahoianu (andrei.blahoianu@cncs-ccsn.gc.ca), de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN), préside le groupe IAGE. Mme. Karen Gott (karen.gott@ssm.se), de l'Autorité de sûreté radiologique suédoise (Strål säkerhets myndigheten) préside le Projet OPDE et le Groupe de travail SSC du projet SCAP. M. Alejandro Huerta (alejandro.huerta@oecd.org) travaille à la Division de la sûreté nucléaire de l'AEN. Prof. Naoto Sekimura (sekimura@n.t.u-tokyo.ac.jp), du Department of Nuclear Engineering and Management de l'Université de Tokyo, assure la présidence du projet SCAP. M. Akihiro Yamamoto (akihiro.yamamoto@oecd.org) travaille à la Division de la sûreté nucléaire de l'AEN.

- méthodes reconnues de détection et de surveillance de la dégradation due au vieillissement ;
- mesures reconnues permettant de limiter le vieillissement, d'en réparer les effets et de remplacer les composants détériorés ;
- système fiable de documentation sur l'installation, sans oublier l'optimisation du programme de gestion du vieillissement en fonction des connaissances et savoirs les plus récents et des auto-évaluations périodiques ;
- existence d'un service et d'une base de connaissances techniques.

Ces dernières années, l'intérêt pour la gestion du vieillissement des centrales s'est accentué, en particulier parce que l'on envisage de prolonger la durée de vie d'un nombre croissant de centrales nucléaires dans le monde. C'est dans ce contexte que l'AEN a mené de nombreuses études techniques pour évaluer l'impact des mécanismes de vieillissement sur la sûreté et la fiabilité de l'exploitation des centrales. Des recherches internationales ont également été entreprises afin de constituer une base technique sur laquelle pourront s'appuyer les décisions.

Nous décrivons dans cet article certaines activités et réalisations du Groupe de travail sur l'intégrité des composants et des structures (IAGE) du Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) de l'AEN, du Projet d'échange de données sur les ruptures de tuyauteries (OPDE) ainsi que du Projet sur la fissuration par corrosion sous contrainte et le vieillissement des câbles (SCAP).

Travaux réguliers de l'AEN sur les mécanismes de vieillissement

Les activités du groupe IAGE visent à approfondir nos connaissances et notre compréhension des mécanismes de vieillissement, des propriétés des matériaux, des conditions de fonctionnement et des effets du milieu, ainsi que des sites d'endommagement potentiels et des conséquences

des dégradations et défaillances. Dans les programmes de gestion du vieillissement, ce groupe s'est particulièrement intéressé aux inspections, au suivi et à l'évaluation des programmes de gestion du vieillissement ainsi qu'aux mesures prises pour limiter le vieillissement, réparer ses effets et remplacer les composants détériorés.

Étant donné les niveaux de compétences exigés lorsque l'on étudie les questions d'intégrité et de vieillissement des différents composants, le groupe IAGE se fait assister par trois sous-groupes qui sont chargés respectivement de l'intégrité et du vieillissement des composants métalliques, de l'intégrité et du vieillissement des structures en béton et du comportement sismique des composants et des structures.

Le cyclage thermique est un problème récurrent très répandu dans les centrales nucléaires du monde entier. Plusieurs incidents ayant provoqué une fuite de réfrigérant primaire dans l'enceinte de confinement ont menacé l'intégrité des centrales nucléaires, bien qu'aucun rejet n'ait eu lieu hors de l'enceinte. Le cyclage thermique est un phénomène complexe où interviennent des phénomènes relevant de la thermohydraulique, de la mécanique de la rupture, de l'étude des matériaux et de l'exploitation de la centrale. Le groupe IAGE a entrepris un programme de travail sur le cyclage thermique afin de fournir aux pays membres de l'AEN des informations sur le retour d'expérience, les politiques réglementaires, les contre-mesures en place ainsi que l'état actuel des études et recherches dans ce domaine. Ce programme devrait aussi permettre d'identifier les domaines à approfondir dans le cadre de recherches nationales et internationales.

Ce programme a consisté à :

- Passer en revue le retour d'expérience, les cadres réglementaires, les contre-mesures ainsi que les recherches actuelles sur ce thème. Les résultats sont décrits dans le document NEA/CSNI/R(2005)8.
- Organiser un exercice de comparaison pour évaluer les capacités de calcul de l'amorçage et de la propagation des fissures sous chargement thermique cyclique dans les pays membres et, à terme, élaborer des critères de sélection des composants vulnérables. Les résultats de cet exercice ont été publiés dans le document NEA/CSNI/R(2005)2.
- Organiser une série de conférences internationales sur la fatigue des composants de réacteurs pour dresser un bilan des progrès accomplis dans ce domaine et permettre à des spécialistes de haut niveau d'échanger informations et

réflexions. La périodicité de ces conférences est de deux ans, ce qui permet de suivre les progrès réalisés et de concentrer les recherches sur les aspects les plus importants.

Par ailleurs, le groupe IAGE est sur le point d'entreprendre une nouvelle activité consistant à évaluer la possibilité de transposer à des structures et composants les données sur la fatigue recueillies sur des éprouvettes standard, y compris les effets du milieu. Il s'agit par là de s'assurer de la validité d'utilisation des codes pour analyser la fatigue des composants, de proposer une synthèse des essais de fatigue effectués sur les composants et structures et de sélectionner un jeu d'essais de référence pour vérifier la réglementation proposée dans différents pays.

Plusieurs cas de fissuration par corrosion sous contrainte d'alliages et de soudures à base de nickel se sont produits dans le circuit primaire. Parmi les exemples récents on retiendra la fissuration des départs ou piquages des boucles primaires et des adaptateurs de couvercles de cuve. Bien que des recherches considérables aient été consacrées aux tubes de générateurs de vapeur, on connaît mal la vulnérabilité des sections épaisses à ce type de dégradation. Or, on a besoin de cette information pour les alliages déjà employés dans les composants mais aussi pour ceux des composants qui viendront les remplacer. L'AEN a beaucoup publié sur des événements liés à la fissuration par corrosion sous contrainte (CSC), dont des comparaisons du retour d'expérience, des pratiques d'inspection et des critères de réception employés dans les différents pays [NEA/CSNI/R(2006)8], mais aussi des informations sur les ruptures de tuyauteries, dans le cadre du Projet OPDE et sur les défaillances de composants sous l'effet de la fissuration par CSC dans le cadre du Projet SCAP, cela afin d'établir une synthèse des acquis et expériences pour en déduire des pratiques recommandées.

Le rayonnement que subit la cuve sous pression des réacteurs provoque une fragilisation des matériaux qui a été l'objet de diverses activités du CSIN en raison de sa capacité de réduire les marges de sûreté en cas de choc thermique sous pression. Ce choc thermique sous pression reste un sujet pertinent lorsqu'il s'agit de prolonger la durée de vie des centrales, et son analyse exige de recueillir des quantités importantes de données et de tenir compte des incertitudes associées (transitoires, propriétés de matériaux, distribution des défauts). L'approche déterministe étant trop conservatrice, de nombreux pays recourent à des méthodologies probabilistes ou en mettent au point.

Aperçu du contenu de la base données OPDE

Mécanisme de dégradation ou d'endommagement	Nombre d'enregistrements par type de défaillance		
	Fissure non traversante/ amincissement de la paroi	Fuite de liquide radioactif	Défaillance de la structure
Corrosion (dont corrosion par effet de crevasse, corrosion par piqûres, corrosion galvanique, corrosion microbiologique)	45	272	5
Erreurs de conception, de construction et de fabrication	79	239	9
Corrosion-érosion et corrosion accélérée par l'écoulement	190	327	50
Fissuration par corrosion sous contrainte (ECCS, IGSCC, PWSCC, TGSCC)	837	273	0
Fatigue thermique (dont stratification thermique, zones de mélange et faïençage)	62	63	3
Fatigue vibratoire	60	810	48
Autres [dont érosion de cavitation, fretting, coup de bélier, fissuration par corrosion induite par déformation (SICC), à classer]	48	147	44
Total	1 321	2 131	159

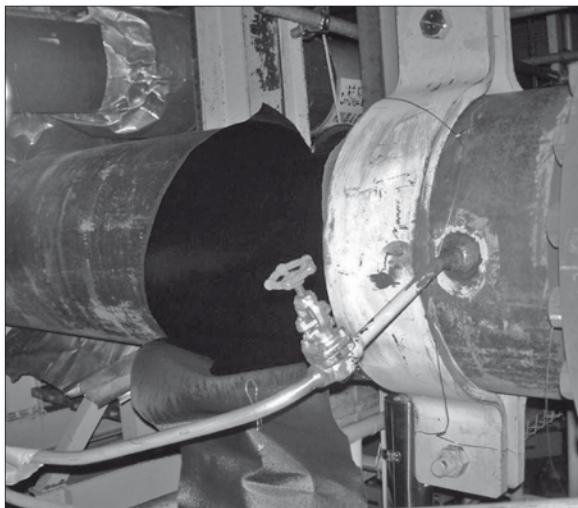
Projets de l'AEN consacrés aux ruptures de tuyauteries

L'intégrité physique des systèmes de tuyauteries est essentielle pour la sûreté et le fonctionnement des centrales. C'est pourquoi, les autorités de sûreté de 11 pays ont décidé de recueillir des informations sur la dégradation et la rupture de composants de tuyauteries et de circuits. Le Projet OCDE/AEN d'échange de données sur les ruptures de tuyauteries (OPDE), lancé en 2002, fournit un retour d'expérience systématique sur la réglementation des réacteurs et les programmes de R-D portant sur les contrôles non destructifs, les programmes d'inspection en service, les évaluations de la fuite avant rupture, l'optimisation des stratégies d'inspection en service basée sur la notion de risque et les applications des études probabilistes de sûreté (EPS) à la fiabilité de composants passifs.

Le projet OPDE concerne les composants de tuyauteries métalliques représentatifs du circuit primaire, des systèmes de sauvegarde et de sûreté ainsi que les circuits auxiliaires (composants appartenant aux classes 1, 2 et 3 du Code de l'ASME ou

équivalents). Il inclut également les tuyauteries non classées de « sûreté » dont la fuite pourrait provoquer des événements initiateurs de cause commune tels que l'inondation de parties vitales de la centrale. Les types de dégradation ou de défaillance concernés sont les défaillances en service, l'amincissement de la paroi interne des tuyauteries et des fissurations non traversantes ainsi que des brèches de l'enveloppe sous pression allant des plus petites (trous d'épingles) à des défaillances structurales importantes (brèches ou ruptures de tuyauterie). En d'autres termes, la base de données OPDE recouvre la dégradation et la défaillance de tuyauteries de haute et moyenne énergie ainsi que de tuyauteries classées de sûreté ou non.

En juin 2009, cette base contenait près de 3 600 enregistrements sur des défaillances de tuyauteries survenues dans 321 centrales nucléaires cumulant 8 300 années-réacteur. Environ la moitié de ces données concernent des REP, 44 % des REB et 4 % des réacteurs à eau lourde sous pression (CANDU). Le tableau ci-dessus récapitule le contenu de la base de données d'OPDE.



Une rupture de tuyauterie à Mihama 3, au Japon, en août 2004.

Projet de l'AEN sur la fissuration par corrosion sous contrainte et le vieillissement des câbles

Le projet SCAP de l'OCDE/AEN a été lancé en 2006 et financé par une contribution volontaire du Japon. Ce projet, qui doit s'achever en 2010, a pour objectifs de constituer une base de données complète ainsi qu'une base de connaissance sur la fissuration par corrosion sous contrainte et le vieillissement des câbles et d'évaluer les données de façon à en dégager des pratiques recommandables que pourraient adopter les autorités de sûreté et les exploitants pour améliorer la gestion du vieillissement.

La base de données SCC du projet SCAP porte sur la dégradation ou la défaillance de composants passifs par fissuration par CSC dans les centrales nucléaires des pays participants. Elle concerne les composants de l'enveloppe sous pression appartenant aux classes 1 et 2 du Code de l'ASME, les internes de la cuve du réacteur ainsi que d'autres composants ayant une grande importance pour l'exploitation, à l'exclusion des tubes de générateurs de vapeur. Les mécanismes qui suivent sont étudiés : fissuration intergranulaire par CSC d'aciers inoxydables austénitiques et de matériaux à base de nickel, fissuration par CSC sous irradiation, fissuration par CSC en milieu primaire et fissuration externe par CSC en milieu chloruré et fissuration transgranulaire par CSC.

La base de données de SCAP sur les câbles électriques ou optiques inclut les câbles des systèmes de sauvegarde (dont ceux qui participent au refroidissement de secours du cœur), les câbles

importants pour la sûreté (nécessaires pour éviter les accidents de dimensionnement et en atténuer les effets) et les câbles essentiels au fonctionnement de la centrale (câbles dont la défaillance pourrait provoquer l'arrêt du réacteur ou une baisse de puissance du réacteur). La base recouvre des câbles dont la tension atteint 15 kV ca et 500 V cc au maximum, ainsi que les câbles du contrôle commande. Cette base de données est conçue comme une aide pour les autorités de sûreté, propriétaires de centrales, exploitants et concepteurs lorsqu'ils doivent choisir les câbles adaptés à des environnements plus ou moins sévères et évaluer les performances des câbles actuels.

Les spécifications de fonctionnement de la base de données SCAP, le format et les consignes de codage des données ont été définis, et l'on se concentre actuellement sur l'alimentation de la base ainsi que sur une première évaluation des données recueillies à ce jour. Avec la base de connaissances et les pratiques exemplaires à établir, cette base constituera un outil à l'usage des pays membres qui souhaitent se doter de programmes adaptés de gestion du vieillissement. Le rapport final sur le projet doit paraître en 2010. Il décrira les bases techniques sur lesquelles seront élaborées des pratiques exemplaires destinées à faciliter le travail des autorités de sûreté dans le domaine de la fissuration par CSC et l'isolement des câbles. Un atelier de clôture est prévu en mai 2010 afin de présenter et de débattre des résultats du projet.

Autres aspects de la gestion du vieillissement

Au cours des dernières décennies, l'industrie nucléaire a pu observer la dégradation de nombreux composants du circuit primaire comme du circuit secondaire. Cette dégradation et les inspections associées, auxquelles sont venus s'ajouter des facteurs économiques et politiques, sont à l'origine d'une demande de programmes d'inspections en service plus efficaces et rentables permettant de s'assurer que les marges de sûreté sont respectées et que la dégradation prévue des composants ne peut provoquer de défaillance à l'origine d'accidents ni même d'arrêts non programmés ayant des effets négatifs sur la fiabilité de la production d'électricité. C'est dans ce contexte que les autorités de sûreté et les entreprises d'électricité de nombreux pays ont mis au point et appliqué des méthodes d'optimisation des stratégies d'inspection en service fondées sur la notion de risque (RI-ISI) de même que des exigences plus contraignantes pour démontrer le bon fonctionnement des systèmes de contrôles non destructifs employés pour inspecter

les composants des systèmes importants pour la sûreté qui sont exposés à plusieurs mécanismes de dégradation.

Le groupe IAGE a recueilli au moyen d'un questionnaire, puis compilé, des données sur les pratiques employées en matière de RI-ISI et sur leur état d'avancement dans les pays membres de l'AEN. Les résultats de cette enquête sont reproduits dans le document NEA/CSNI/R(2005)3. Pour compléter les informations techniques ainsi recueillies, le CSIN a organisé un atelier à Stockholm en Suède. Les communications présentées à cette occasion ont été publiées sous la référence NEA/CSNI/R(2004)9. Un rapport a été établi d'après les informations ainsi collectées et publié sous le titre *Status Report on Developments and Co-operation on Risk-informed In-service Inspection and Non-destructive Testing (NDT) Qualification in OECD/NEA Member Countries* (NEA/CSNI/R(2005)9).

Si l'on veut préserver l'intégrité des structures, il importe également de gérer le vieillissement de toutes les structures en béton qui assurent une fonction de sûreté. C'est la raison pour laquelle plusieurs programmes nationaux et internationaux ont été consacrés à l'étude des effets du vieillissement et des mécanismes possibles de ruine afin de mieux comprendre ces phénomènes.

Une série d'ateliers organisés sous les auspices du CSIN était destinée à répondre aux préoccupations des bureaux d'étude, des exploitants et des autorités de sûreté concernant le comportement des structures en béton des installations nucléaires. Elle fut l'occasion d'échanges d'informations et de bonnes pratiques entre responsables de centrales et de programmes nationaux et internationaux et a éclairé les décisions d'autres organisations internationales comme l'AIEA et la CE. Les thèmes choisis pour ces ateliers étaient la perte de la précontrainte [NEA/CSNI/R(97)9], les contrôles non destructifs du béton [NEA/CSNI/R(97)28], l'analyse des structures en béton dégradées par la méthode des éléments finis [NEA/CSNI/R(99)1], l'instrumentation [NEA/CSNI/R(2000)15] ainsi que la surveillance et les réparations [NEA/CSNI/R(2002)7].

En 2008, le groupe IAGE a parrainé un atelier sur la gestion du vieillissement de structures en béton de forte épaisseur, portant notamment sur les techniques d'inspection en service, de maintenance et de réparation, les méthodes d'instrumentation et les études de sûreté effectuées en prévision d'une prolongation de la durée de vie de la centrale. L'objectif était de présenter et d'étudier les techniques modernes d'évaluation de l'intégrité des

structures en béton et de recommander des domaines de recherche à approfondir. L'accent était mis sur les inspections en service effectuées en fonction des performances par des méthodes de contrôles non destructifs (impact-écho, ultrasons, radar haute fréquence) et sur l'instrumentation. Leurs domaines d'application ont été abondamment analysés. Dans le cadre des études de sûreté des installations effectuées en prévision de la prolongation de la durée de vie des installations, la question des programmes de gestion du vieillissement reposant sur une surveillance adaptée des structures a également été abordée. Les méthodes probabilistes employées dans les études de fiabilité structurale ont été également évoquées, et notamment les moyens de gérer de manière cohérente les évaluations des constructions civiles.

Pour terminer, le sous-groupe du IAGE qui se consacre au comportement sismique des composants et structures a participé à de nombreuses activités entreprises pour évaluer la sûreté sismique des centrales nucléaires. En 2008, il a publié un rapport qui fait la synthèse des conclusions et recommandations des ateliers consacrés à la caractérisation technique des signaux sismiques d'entrée, à la relation entre les données sismologiques et le génie parasismique et d'un atelier sur les calculs des mouvements sismiques d'entrée intégrant les résultats des études géologiques récentes. Ce sous-groupe a également organisé une réunion de spécialistes sur l'évaluation de l'aléa sismique et s'intéresse actuellement aux études des effets des séismes sur les composants métalliques détériorés. C'est dans ce contexte qu'il analyse les effets du séisme, survenu à Niigata-ken Chuestu-oki le 16 juillet 2007, sur la centrale de Kashiwazaki-Kariwa ainsi que ses implications pour les centrales nucléaires à travers le monde. ■