



FR0106932

Endommagement par fatigue des installations nucléaires

23 novembre 2000

Règles de dimensionnement et prévention

**Démarche générale de prévention du risque d'endommagement par
fatigue des matériels des chaudières nucléaires :
de la conception au suivi en exploitation**

J.-M. GRANDEMANGE, FRAMATOME ANP

C. FAIDY, EDF

"REGLES DE PREVENTION DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE DES EQUIPEMENTS SOUS PRESSION DES INSTALLATIONS NUCLEAIRES AU STADE DU DIMENSIONNEMENT ET DU SUIVI EN EXPLOITATION

Auteurs : JM. GRANDEMANGE *, C. FAIDY **

Résumé:

Le dommage de fatigue, défini par l'apparition de fissures macroscopiques dans les composants des circuits sous pression des installations nucléaires ne doit pas être confondu avec celui d'une éprouvette de même matériau soumise à une déformation cyclique considérée comme équivalente. Ainsi, l'utilisation de résultats d'expérience de fatigue sur éprouvette en vue de l'estimation de la résistance à la fatigue des composants nécessite-elle une transposition convenable.

La communication présente la logique d'ensemble de la démarche retenue par le RCC-M au stade de la conception et de la construction, en vue de la prévention de ce risque: - modulation des exigences d'analyse et des précautions de réalisation en fonction du risque,
- règles de détermination des courbes de fatigue utilisables à la conception à partir des résultats obtenus sur éprouvette,
- règles d'analyse détaillée et règles d'analyse simplifiées utilisables, et indices de contrainte et corrections de plasticité associées,
- considération du risque de propagation par fatigue des défauts au stade des études de prévention du risque de rupture brutale.

Les garanties apportées à la conception devant être maintenues en exploitation, la communication présente ensuite la démarche retenue par les règles d'exploitation du RSE-M et aborde notamment:

- les modalités de suivi et de comptabilisation des transitoires en exploitation et leur comparaison aux hypothèses de conception,
- la prise en compte des analyses de conception dans la définition des programmes de surveillance,
- la prise en compte des risques de propagation par fatigue au niveau des règles d'acceptabilité des défauts éventuellement découverts lors des contrôles périodiques.

L'exposé passe ensuite en revue les éléments essentiels du retour d'expérience d'exploitation et aborde les modalités de leur prise en compte dans les évolutions périodiques des précautions de conception".

* FRAMATOME ANP

** EDF-SEPTEN

DEMARCHE GENERALE DE PREVENTION DU RISQUE D'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE DES MATERIELS MECANQUES DES CHAUDIERES NUCLEAIRES: DE LA CONCEPTION AU SUIVI EN EXPLOITATION

J.M. Grandemange FRAMATOME ANP
C. Faidy EDF/Septen

RESUME

La communication présente dans ses grandes lignes la démarche retenue dans l'industrie nucléaire en matière de prévention du risque de fatigue. Elle rappelle les origines des courbes de fatigue du code de construction, et présente l'articulation des différentes exigences techniques mises en œuvre lors de la conception et de la construction.

Les garanties apportées à la conception devant être maintenues en service, la communication aborde également les modalités de suivi des transitoires en exploitation, ainsi que les dispositions relatives aux inspections périodiques et au traitement des indications détectées, qui sont en relation avec les précautions prises à la conception.

1 INTRODUCTION

Si la résistance des structures aux charges statiques a été étudiée très tôt, en particulier en vue de la construction des grands édifices, ce n'est pas avant l'ère industrielle que la résistance des structures aux variations cycliques des chargements a été étudiée. Les ingénieurs ont en effet découvert que les machines utilisées dans les mines et manufactures pouvaient être le siège de ruptures de pièces après une certaine période d'utilisation, même si la contrainte nominale était limitée. Cette "fatigue" apparaissait plus rapidement lorsque ces pièces présentaient des variations brutales de géométrie.

Les premières études sont attribuées à Albert, un ingénieur allemand, qui a étudié en 1829 la résistance des chaînes utilisées dans les mines sous des charges de traction significatives. A partir de 1840, des études ont été conduites en Angleterre par Rankine et Hodgkinson sur l'emploi du fer et de la fonte dans les chemins de fer et les ponts. Des essais systématiques ont été conduits par Wöhler en 1849, conduisant aux premières lois expérimentales ci-après:

- le fer et l'acier peuvent rompre sous une charge inférieure à la résistance à la traction, ou même à la limite d'élasticité du matériau, si le chargement est répété un nombre suffisant de fois,
- la rupture n'apparaît pas, même après un nombre très grand de cycles, si la différence entre les niveaux de contrainte minimum et maximum est inférieure à une valeur limite.

Cette valeur limite a été appelée "résistance de service" par Wöhler, "charge naturelle de rupture" par Tresca, et "limite d'élasticité naturelle" par Baushinger. Elle est aujourd'hui appelée "limite d'endurance". Les travaux ont ensuite été poursuivis jusqu'à ce jour et ont conduit à une meilleure connaissance des mécanismes d'endommagement par fatigue, qui font notamment l'objet de l'exposé d'introduction de la présente journée technique [1].

Les règles d'analyse de fatigue appliquées aux matériels mécaniques des chaudières nucléaires ont tout d'abord été intégrées dans le code ASME III au cours des années 60 et ont fait l'objet d'une présentation dans les "Criteria" relatifs à ce code [2]. La présente communication s'attache à présenter la démarche générale retenue par le code français de construction des chaudières nucléaires à eau pressurisée RCC-M [3], et le code relatif à la surveillance en exploitation de ces matériels RSE-M [4].

2 LES BASES DES COURBES DE FATIGUE DES CODES NUCLEAIRES

Les règles applicables en matière de prévention du risque d'endommagement par fatigue dans les composants nucléaires sont essentiellement issues des dispositions du code ASME [2], les différents pays ayant apporté à ces règles des compléments et pratiques spécifiques résultant de leur expérience industrielle. Ces dispositions sont en particulier à la base des règles du RCC-M applicable en France, du KTA applicable en Allemagne, ainsi que des pratiques des différents pays européens, Espagne, Italie, Royaume-Uni, Finlande, Belgique, etc., ainsi qu'en fait état un récent travail de synthèse effectué dans le cadre d'une étude commandée par la Commission Européenne [5].

2.1 Courbes expérimentales médianes

Les courbes de fatigue oligocycliques sont obtenues à partir d'essais de fatigue conduits sur des éprouvettes lisses sollicitées en déformations imposées traduites en contraintes en les multipliant par le module d'élasticité du matériau. Il ne s'agit donc pas de contraintes réelles et il conviendra d'en tenir compte dans les analyses lorsque les effets de plasticité seront à prendre en compte.

Le développement de courbes de fatigue nécessite un grand nombre d'essais effectués dans un domaine de nombres de cycles à rupture compris entre 10^2 et 10^6 , voire davantage. Ainsi que l'observait Langer [6], le nombre d'essais nécessaires serait excessif, s'il fallait les conduire systématiquement pour les différents matériaux. Heureusement, Coffin [7] a établi une relation simplifiée permettant le tracé d'une courbe de fatigue à partir des propriétés mécaniques conventionnelles:

$$\sqrt{N} \varepsilon_p = c \quad (1)$$

où: c est une constante
 ε_p est la déformation plastique
 N est le nombre de cycles à rupture

Coffin identifia la constante c comme pouvant être prise égale, de manière pessimiste, à la moitié de la déformation vraie à la rupture, déterminée à partir de l'essai de traction:

$$c = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{100}{100-Z} \right) \quad (2)$$

où Z est la réduction de section (%) à rupture dans l'essai de traction.

Si l'on exprime que la déformation totale ε_t est égale à la somme d'une déformation élastique $\varepsilon_e = 2S_e / E$ et d'une déformation plastique ε_p , on peut écrire:

$$S = E \frac{\varepsilon_t}{2} = E \frac{\varepsilon_p}{2} + S_e \quad (3)$$

où S est l'amplitude de contrainte totale (simple amplitude). En remplaçant ε_p et c par les expressions (1) et (2) respectivement, et en substituant de manière conservative à l'amplitude de variation de contrainte élastique S_e la limite d'endurance B , on obtient l'expression suivante:

$$S = \frac{E}{4\sqrt{N}} \ln \left(\frac{100}{100-Z} \right) + B \quad (4)$$

Cette expression indique une tendance générale montrant que les propriétés de fatigue sont corrélées à la limite d'endurance et à la ductilité du matériau. Elle n'a pas été exploitée directement, mais a fourni l'expression permettant l'interprétation statistique des résultats expérimentaux de fatigue obtenus sur éprouvettes lisses, conduisant aux courbes expérimentales médianes, également connues sous le nom de "Best Fit Curves".

Les comités ASME ont retenu les expressions suivantes [2] pour décrire la médiane des résultats d'essai obtenus:

- Aciers au carbone: A = 68,5% B = 149 MPa E = 206910 MPa
- Aciers faiblement alliés: A = 61,4% B = 266 MPa E = 206910 MPa
- Aciers inoxydables et bases Nickel: A = 72,6% B = 300 MPa E = 195185 MPa

2.2 Courbes de conception

Les courbes ci-dessus ne sont pas directement utilisables pour les besoins de la conception, du fait de la dispersion des résultats expérimentaux, et des différences existant entre éprouvette et structure réelle.

Ainsi qu'indiqué dans la circulaire de l'arrêté du 26 février 1974 [8] réglementant la construction des circuits primaires principaux des chaudières nucléaires, "il convient de souligner que le dommage examiné ici concerne l'appareil lui-même et qu'il ne doit pas être confondu avec celui d'une éprouvette du même matériau soumise à une déformation cyclique considérée comme équivalente. Il existe en effet entre ces deux cas des différences importantes, une éprouvette se comportant en général bien mieux en ce domaine qu'une enceinte sous pression; aussi l'utilisation de résultats d'expérience de fatigue sur éprouvettes en vue de l'estimation prescrite demande-t-elle une transposition convenable".

C'est la raison pour laquelle les courbes de conception ont été déterminées à partir des courbes expérimentales médianes déterminées à partir de la distribution des données expérimentales obtenues sur éprouvettes lisses, en leur appliquant le plus défavorable des facteurs correctifs suivants: un facteur 1/2 sur les contraintes, ou un facteur 1/20 sur les durées de vie: Figure 1. Ces facteurs ne sont pas à proprement parler des coefficients de sécurité, mais des facteurs d'incertitude visant à couvrir, outre la dispersion des données, des effets négligés tels que effet de taille, d'état de surface, ou d'environnement.

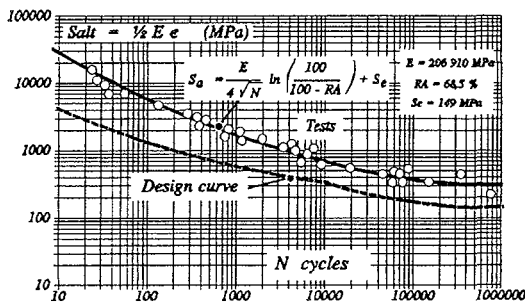


Figure A-1 Carbon Steel

Comparison between Tests, Best-Fit and Design Curves

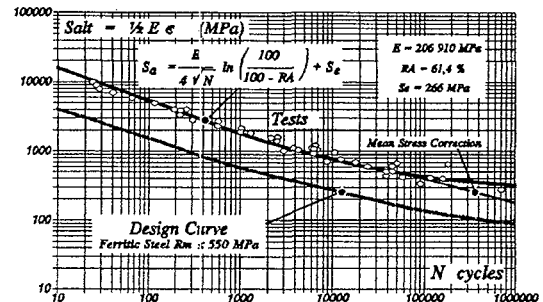


Figure A-2 Low-Alloy Steel

Comparison between Tests, Best-Fit and Design Curves

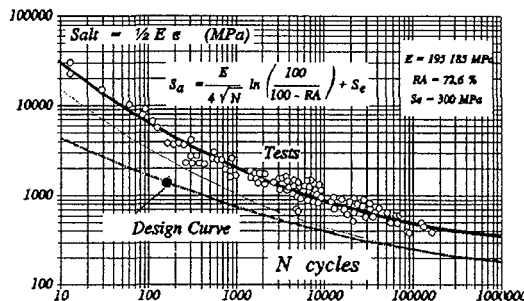


Figure A-3 Austenitic Steel

Comparison between Tests, Best-Fit and Design Curves

Figure 1: Comparaisons entre résultats d'essais, courbes médianes, et courbes de conception (extrait de [5])

Ces facteurs, qui ont résulté dans un premier temps du jugement d'ingénieur des comités ASME, ont fait l'objet depuis 30 ans d'un certain nombre de travaux visant à mieux apprécier la part de ces effets qui peut être considéré comme couverte par les facteurs 2 et 20, et donc celle qui doit être explicitement évaluée en complément aux règles codifiées, lorsqu'elle ne peut plus être considérée comme couverte par les courbes de fatigue du code.

Le rapport [5] comporte une synthèse de ces travaux, dont est en particulier extrait le tableau 1 indiquant les facteurs F_S et F_N à appliquer – selon les différents auteurs – respectivement sur l'amplitude de contrainte S et le nombre de cycles N pour tenir compte des effets indiqués.

Référence	O'Donnell [9]		Keisler et al USNRC [10] (a)		PVRC WG Evaluation methods [11] (a)		Manjoine et Tome [12]		Manjoine et Johnson [13]		NUREG / CR 6260 & Harvey [14]	
	F_S	F_N	F_S	F_N	F_S	F_N (min-max)	F_S	F_N	F_{SE} (b)	F_{SI} (c)	F_S	F_N
Marge de conception												
Dispersion du matériau	1,19	2,11	1,7	2,5		2,0-2,5	1,15		1,10	1,49		2,0
Etat de surface	1,19	2,11	1,3	3,0		1,0-1,5	1,15		1,19	1,09		2,5
Effets de géométrie et taille	1,19	2,11	1,25	1,4		1,0-1,2	1,15		1,16	1,06		4,0
Environnement (air)	1,19	2,11					1,15		1,10	1,41		(c)
Règle de cumul des dommages						1,8-2,5			1,06	1,75		
Multiaxialité						1,0-1,3						
Contraintes résiduelles							1,15		1,12	1,04		
<u>TOTAL</u>	<u>2,0</u>	<u>20,0</u>	<u>1,7</u>	<u>4,0</u>		<u>3,6-14,6</u>	<u>2,0</u>		<u>2,0</u>	<u>4,4</u>		<u>20,0</u>

Table 1: Considération des différents effets selon divers auteurs

NOTES: (a): Les facteurs proposés convertissent la courbe moyenne obtenue sur éprouvette en une courbe correspondant à une probabilité d'amorçage de 5%
 (b): facteur appliqué à la composante élastique de l'amplitude de déformation, dominant à grand nombre de cycles
 (c): facteur appliqué à la composante inélastique de l'amplitude de déformation, dominant à faible nombre de cycles
 (b): facteur intégré dans le facteur 4,0 ci-dessus.

La référence [5] liste également divers facteurs, qui sont:

- Soit sans effet ou intégrés explicitement dans l'établissement des courbes de fatigue de conception: il s'agit notamment de l'effet de la contrainte équivalente au sens de Von Mises ou de Tresca, considéré au travers du choix de la courbe de fatigue applicable [15], ou de la contrainte moyenne, qui est prise en compte dans les courbes de conception au travers d'une correction faisant appel au diagramme de Goodman modifié [2].
- Soit intégrés dans la courbe moyenne de fatigue: taille de lingot et taux et orientation du corroyage, traitements thermiques, taille de grain, forme du produit, composition chimique du matériau, etc. L'influence de la taille de pièce correspond à des effets mécaniques de répartition des contraintes, à des effets technologiques – des propriétés physiques homogènes étant plus difficiles à obtenir pour des pièces de grande taille – et enfin à des effets statistiques, l'augmentation de taille étant accompagnée d'une augmentation de la probabilité d'existence des sites d'initiation du processus de fatigue.

- Soit à prendre en compte au travers d'exigences de conception ou d'analyse complémentaires: concentrations de contrainte et déformation, effets d'environnement importants, effets du vieillissement ou de l'irradiation, multiaxialité, combinaisons particulières de cycles, spécificité du métal déposé par soudage, vitesse de déformation, préparation de surface, etc.

On notera que certains effets sont, selon certains auteurs, intégrés dans les procédures du code, alors que d'autres auteurs estiment qu'ils doivent faire l'objet d'une évaluation particulière.

On note dans ce tableau un consensus global sur la validité des facteurs 2 et 20 pris en compte lors de l'établissement des courbes de conception du code, les effets non couverts par ces facteurs étant abordés de la manière suivante dans les RCC:

- Les effets résultant des combinaisons de cycles sont considérés être pris en compte au travers de procédures enveloppes de combinaison des cycles dans les évaluations exigées par le code, en combinaison avec la correction de contrainte moyenne intégrée dans la courbe de fatigue de conception.
- Les effets d'interaction fatigue-fluage sont pris en compte dès lors que les températures d'emploi dépassent certains seuils. Ces effets sont abordés dans le RCC-MR [16] applicable aux réacteurs à neutrons rapides. Pour les applications rencontrées dans les réacteurs à eau pressurisée, ces effets sont considérés être négligeables [2],
- Les effets d'environnement sont considérés relever de la responsabilité du concepteur, au travers d'un choix judicieux des matériaux et de la prise en compte du retour d'expérience traduit en dispositions empiriques. Les courbes des codes de construction sont considérées couvrir des effets d'environnement modérés, les effets d'environnement significatifs n'étant à considérer explicitement que lorsque plusieurs seuils sur la composition chimique, la température, la vitesse de déformation et le taux d'oxygène dissous dans le fluide sont simultanément dépassés [17], [18].
- Les effets d'état de surface et de contrainte résiduelle sont considérés être couverts – dans certaines limites – par les courbes de fatigue codifiées; dans les zones fortement sollicitées, des recommandations ont été introduites dans le code pour les limiter.
- Les effets de géométrie (concentrations de contraintes locales, désalignements...) sont à prendre en compte dans la modélisation, ou au travers d'indices de contrainte.

2.3 Evolution des courbes de fatigue

Une extension des courbes de fatigue du code ASME a été proposée en juillet 1982. Les données disponibles sur le plan international ont fait l'objet d'une évaluation critique dans [5], en vue d'une future mise à jour des courbes codifiées. A ces courbes médianes seront appliqués les facteurs discutés ci-dessus, ainsi que les corrections de contrainte moyenne, dont l'effet est plus particulièrement significatif aux grands nombres de cycles.

Il ne faut toutefois pas oublier que le problème essentiel, dans le domaine des grands nombres de cycles, est la connaissance des sollicitations appliquées. Une attention particulière doit donc être portée aux phénomènes locaux et aux problèmes de vibrations, notamment lors des essais préalables à la mise en service industrielle de l'installation, pour les supprimer ou les limiter.

Les rédacteurs du code privilégient de ce fait, au stade de la conception, l'approche visant à éviter autant que faire se peut les situations à grand nombre de cycles, en introduisant notamment des seuils d'alerte sur l'amplitude des fluctuations thermiques et leur durée (80°C pour les tuyauteries en acier inoxydable austénitique et 50°C pour les tuyauteries en acier non allié ou faiblement allié, pour une durée cumulée d'utilisation supérieure à 30 h dans ces conditions), au-delà desquelles la démarche suivante est appliquée:

- réduction des sollicitations, en ajoutant des mélangeurs, en dérivant les fuites aux organes d'isolement, ou en modifiant le tracé des lignes,
- détermination par analyse, essai ou expérience industrielle de la durée maximale d'utilisation admissible,
- arasage des soudures et réduction appropriée de la rugosité et des contraintes résiduelles,
- recommandation d'un programme de surveillance en exploitation.

Cette approche conduit à relativiser l'importance de la précision des courbes de fatigue dans le domaine des grands nombres de cycles. Les propositions d'évolution des courbes de fatigue applicables aux aciers inoxydables austénitiques dans ce domaine pourront donc être intégrées dans le code après obtention d'un consensus international sur le sujet.

2.4 Application aux joints soudés

La résistance à la fatigue des joints soudés peut être affectée par la géométrie de la liaison, la qualité de l'état de surface obtenu, l'état de contrainte résiduel, et les défauts microscopiques internes potentiels. La référence [5] a également évalué le comportement en fatigue des joints soudés, au travers de l'établissement d'une base de donnée rassemblant les résultats expérimentaux disponibles.

Cette synthèse a permis de préciser les effets qui peuvent être considérés comme couverts par les facteurs 2 et 20 précédents, et ceux qui doivent être intégrés explicitement dans l'analyse avant application des courbes de fatigue.

La démarche retenue est claire: l'objectif des coefficients 2 et 20 est de couvrir des effets non explicitement analysés. Il n'est pas de garantir l'existence de coefficients de sécurité de cet ordre pour la structure réelle. Le règlement définit en effet le dommage visé comme étant "l'apparition de fissures macroscopiques dont les dimensions sont cependant assez faibles pour ne pas compromettre la résistance de l'appareil à l'apparition des divers dommages". De même, les criteria du code ASME [2] se satisfont explicitement d'une prévention de l'amorçage – sans marge – dans les structures réelles.

Ceci signifie que si le comportement moyen des joints soudés est inférieur à celui du métal de base, il convient de vérifier si cet effet reste couvert par ces coefficients, c'est à dire que l'application des procédures du code permet de garantir – sans nécessité d'une marge explicite – l'absence d'amorçage macroscopique dans ces zones.

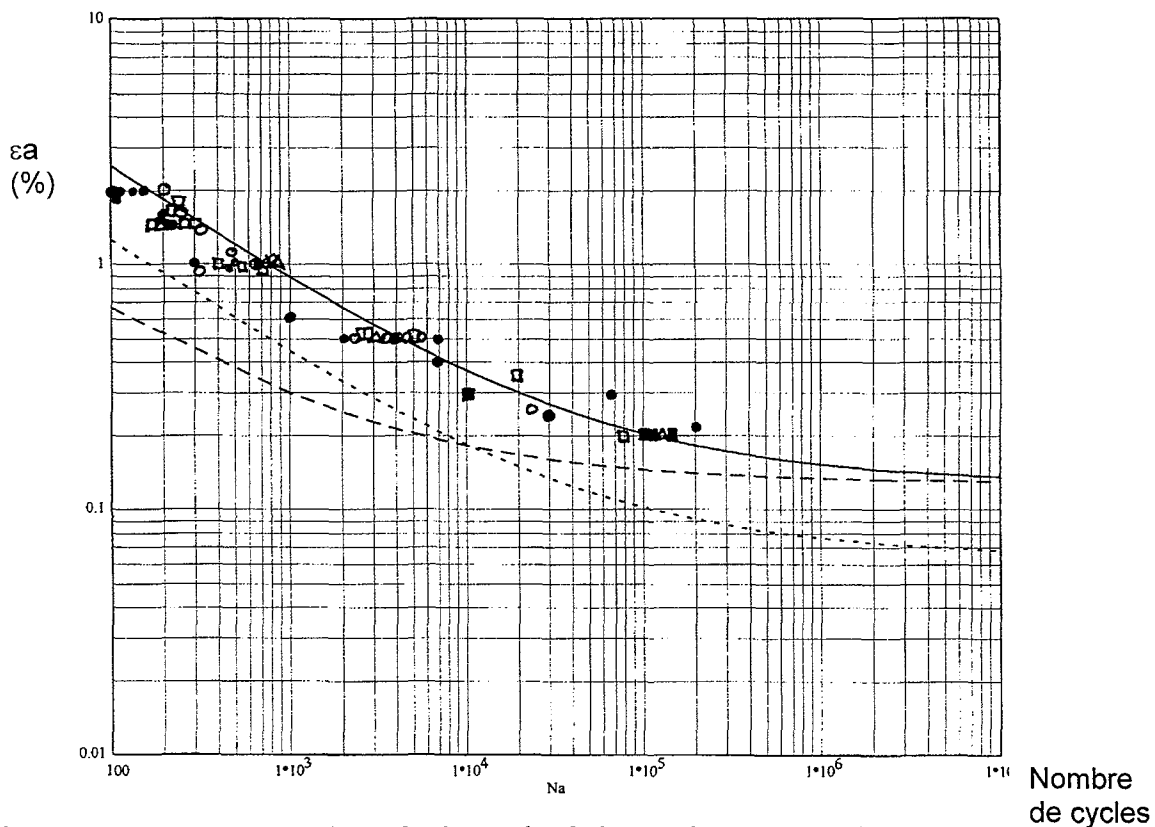


Figure 2: Comparaison des résultats de fatigue obtenus sur joint soudé avec la courbe expérimentale médiane et les courbes déduites de cette dernière par application des facteurs 2 et 20. Exemple d'un acier faiblement allié de type SA 508 Cl.3 (16 MND 5), extrait de [5]. Essais effectués en milieu air, à 20 et 290°C, procédés de soudage automatique et manuel, propriétés déterminées dans les directions longitudinales et transversales.

Les données rassemblées en [5] montrent à cet égard que les courbes de fatigue obtenues sur éprouvette issue d'un joint soudé sont toujours situées au dessus des courbes de conception du code, même si leur distribution statistique est située en dessous de la médiane déterminée pour le matériau de base: figure 2.

Le code de construction retient donc la même courbe de fatigue pour le matériau de base et les joints soudés, l'effet éventuel de la géométrie (désalignement, non-arasage...) étant à prendre en compte explicitement dans la modélisation ou au travers de la prise en compte d'un indice de contrainte, dont la valeur codifiée est fondée sur des résultats expérimentaux.

Il convient en outre d'observer que les joints soudés ont généralement des propriétés de traction supérieures à celles du métal de base, et que de ce fait une courbe exprimée en contraintes se comparerait de manière plus favorable à celle du métal de base. Il en résulte que les corrections de plasticité qui leur seraient applicables pourraient être moins sévères.

Le rédacteur du code n'a pas souhaité, au stade de la conception, entrer dans ces considérations, qui rendraient l'analyse plus complexe, sans bénéfice significatif à cette étape.

3. DEMARCHE GENERALE DES CODES DE CONSTRUCTION NUCLEAIRES

3.1 Généralités

A la différence des démarches proposées tant dans le British Standard que dans le Codap ou le projet de norme harmonisée prEN 13445 [19], où des courbes de fatigue spécifiques à diverses configurations géométriques sont proposées pour les joints soudés, la démarche retenue dans le code ASME Section III, et reprise par les codes RCC-M et KTA est de définir une courbe intrinsèque au matériau, définie selon la démarche discutée en 2, à partir de résultats obtenus sur éprouvette lisse, et de considérer dans l'analyse, soit par modélisation numérique directe, soit au travers de coefficients de concentration de contrainte, de coefficients de réduction de durée de vie en fatigue, ou d'indices de contrainte, l'ensemble des effets non intégrés dans les courbes de fatigue.

La démarche retenue vise à analyser de manière appropriée les différents types de sollicitations mécaniques et thermiques et à définir pour chacun d'eux les approches ou corrections adaptées, ce qu'il est plus difficile de faire en faisant appel à un jeu de courbes spécifiques.

3.2 Nécessité d'une analyse de fatigue

Les matériels des chaudières nucléaires sont classés en trois classes de sûreté, traduites en trois niveaux d'exigences pour l'application du RCC-M. Pour les matériels du niveau 1 – le plus élevé – l'analyse détaillée est exigée dans tous les cas. Fait partie de ce premier ensemble de matériels le circuit primaire principal couvert par les dispositions de l'arrêté du 26 février 1974. Il en va de même des matériels de niveau 2 les plus importants. En application de la règle fondamentale de sûreté II.3.8 [20], des évaluations détaillées ont été réalisées pour les matériels appartenant au circuit secondaire principal.

Outre cette importance des matériels pour la sûreté, le RCC-M considère également les conditions de fonctionnement des matériels en vue de retenir le niveau de construction le plus approprié. Les risques de fatigue font partie de ces critères de classement, et une méthode simplifiée est donnée dans le paragraphe A.4232 du code pour effectuer cette évaluation.

Ces critères, qui sont présentés en [21] considèrent successivement les variations de pression, ainsi que les variations de température. La méthode proposée exploite directement les informations disponibles sur les variations de température de fluide spécifiées, les coefficients intégrés dans la procédure couvrant les effets des variations de température dans l'épaisseur de paroi, dans les zones de variation d'épaisseur, et de part et d'autre d'une liaison bimétallique entre matériaux de caractéristiques différentes.

Les matériels soumis à des sollicitations cycliques significatives au sens de ces dispositions doivent être réalisés selon les règles de niveau 2, ce qui implique notamment un examen volumique complet et l'analyse du matériel selon des dispositions inspirées de celles applicables aux matériels de niveau 1, incluant une analyse détaillée du risque de fatigue.

3.3 Règles générales d'analyse de fatigue

Tous les récipients de niveau 1, ainsi que ceux surclassés en niveau 2 pour des raisons de sollicitations cycliques significatives selon les règles exposées précédemment, font l'objet d'une analyse détaillée selon les principes ci-après. Les corps de pompes sont traitées comme les récipients. Tuyauteries et organes de robinetterie peuvent – au choix – faire l'objet d'une analyse selon des dispositions spécifiques présentées en 3.4, ou faire l'objet d'une analyse détaillée.

La première étape de l'analyse consiste à vérifier les conditions d'adaptation plastique, pour lesquelles, après une première mise en charge pouvant conduire à plastification locale, les cycles ultérieurs se font sans plastification alternée. Ceci est vérifié en s'assurant – c'est l'objet de la règle dite des "3 Sm" bien connue – que l'amplitude de variation des contraintes est inférieure à deux fois la limite d'élasticité du matériau. Dans cette vérification, les contraintes de pointe locales qui peuvent être considérées comme cinématiquement déterminées ne sont pas prises en compte.

Lorsque les conditions d'adaptation plastique sont satisfaites, les résultats de l'analyse élastique sont considérés être directement utilisables pour le calcul du facteur d'usage. Lorsque ce n'est pas le cas, la prévention du risque de déformation progressive est vérifiée en s'assurant que les conditions d'accommodation plastique sont satisfaites, et les déformations plastiques alternées auxquelles ces conditions conduisent sont prises en compte en multipliant l'amplitude de variation de la contrainte totale calculée élastiquement par une correction de plasticité notée K_e , dont les fondements ont été présentés en [22].

Ces travaux ont conduit à une évolution du RCC-M consistant:

- à appliquer à la part des sollicitations mécaniques, une correction de plasticité du type ASME:

$$\text{Si } S_n \leq 3S_m \quad K_e = 1$$

$$\text{Si } 3S_m < S_n \leq 3mS_m \quad K_e = 1 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left(\frac{S_n}{3S_m} - 1 \right)$$

$$\text{Si } S_n > 3mS_m \quad K_e = \frac{1}{n}$$

où n est l'exposant d'écroûissage du matériau, et m une valeur de $S_n/3S_m$ correspondant à une déformation élastique de l'ordre de 0,3%, pour laquelle une valeur maximale de K_e est obtenue,

- à appliquer à la part des sollicitations thermiques une correction de plasticité dont l'expression est la suivante:

$$K_{e_{\text{therm}}} = \max \left(1; 1,86 \left(1 - \frac{1}{1,66 + S_n / 3S_m} \right) \right)$$

Ces deux expressions sont comparées figure 3.

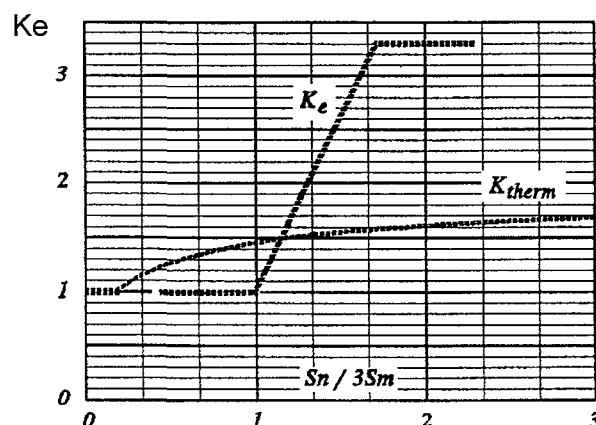


Figure 3: Comparaison des valeurs de K_e mécaniques et thermiques du RCC-M

Des validations complémentaires des dispositions du RCC-M ont été présentées en [5]. Il apparaît à l'issue de ce travail de synthèse que la méthode mixte du RCC-M apparaît appropriée, quoique encore excessivement pessimiste dans certaines configurations.

La raison en est que la démarche retenue vise à rester compatible avec une démarche ASME. Ceci signifie que le K_e "mixte" RCC-M défini ci-dessous peut être substitué à l'expression ASME sans modification de la structure des programmes de calcul:

$$K_{e\text{ mixte}} = K_{e\text{ ASME}} \frac{S_{p\text{ meca}}}{S_{p\text{ total}}} + K_{e\text{ therm}} \frac{S_{p\text{ therm}}}{S_{p\text{ total}}}$$

Il en résulte deux conséquences:

- le K_e ASME étant une fonction des contraintes primaires plus secondaires linéarisées S_n , cette approche générale a été conservée pour le K_e mixte RCC-M, même si la correction applicable aux contraintes thermiques vise essentiellement des corrections de type correction de coefficient de Poisson (K_ν) qui sont fonction des contraintes totales S_p . Afin de pallier les non-conservatismes potentiels, le RCC-M est amené à apporter une correction pour des valeurs de S_n très inférieures à $3 S_m$, dans l'objectif de couvrir de manière pessimiste les différentes configurations, avec un risque de sévérité excessive dans un certain nombre de cas.
- d'autre part, la correction proposée pour les contraintes thermiques ne couvre pas les effets des contraintes dues à un chargement mécanique secondaire. Le code est donc amené à appliquer la correction ASME pour cette part du chargement, ce qui est – ici encore – excessivement pessimiste.

Ces corrections de plasticité pourront donc encore faire l'objet d'optimisation dans le futur dans les deux domaines évoqués.

3.4 Règles spécifiques aux tuyauteries et organes de robinetterie

La démarche générale de l'analyse à la fatigue des tuyauteries et organes de robinetterie est semblable à celle présentée ci-dessus. Elle n'est donc simplifiée que sur le plan de la méthode de détermination des amplitudes de variation des contraintes associées aux différentes composantes du chargement.

Ces amplitudes sont déterminées en faisant appel à des "indices de contrainte", qui ne sont pas simplement des rapports de contrainte, mais plutôt des rapports de chargements: pour un mode d'endommagement donné, et un type de sollicitation donné, l'indice de contrainte est le rapport du chargement correspondant à l'apparition de ce mode de ruine pour l'équipement ou la configuration considérée, au chargement de ruine de la tuyauterie droite standard à laquelle cet équipement est destiné à être relié [23], [24].

3.5 Procédures de calcul du facteur d'usage

Une spécificité du RCC-M est constituée par le soin avec lequel les procédures de combinaison des transitoires spécifiés ont été décrites dans le code. La procédure de base du calcul fait appel à la règle de cumul linéaire des dommages de Miner, qui s'écrit:

$$U = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

où n_i est le nombre de cycles spécifiés de type i ,
et N_i le nombre de cycles admissible de type i .

Cette règle de base est complétée par de nombreuses précisions portant sur les combinaisons de cycles, les situations spécifiées devant être considérées deux à deux, afin de considérer toutes les combinaisons possibles des situations et retenir les plus défavorables. De même, les sous-cycles englobés par des cycles d'amplitude plus grande font l'objet de dispositions spécifiques, ainsi que les sollicitations sismiques, dont la combinaison avec les situations spécifiées est précisément décrite.

Parmi les points d'intérêt des pratiques de l'industrie nucléaire figure la sélection des combinaisons d'instant à retenir pour la détermination des amplitudes de variation des contraintes à comparer aux

courbes de fatigue. Ce point est d'autant plus important que les analyses font appel à des corrections de plasticité raffinées.

En effet, dès lors que ces corrections sont déterminées en fonction de l'amplitude de variation des contraintes linéarisées S_n et qu'elles sont destinées à être appliquées aux amplitudes de variation des contraintes totales S_p , les variations de ces deux grandeurs étant a priori déphasées, deux approches sont possibles:

- retenir les valeurs maximales de S_n et S_p , même si elles ne sont pas atteintes pour le même couple d'instant. Si cette méthode est compatible avec une définition simple du K_e , elle conduit à des procédures excessivement compliquées dès lors qu'une partition entre parties mécaniques et thermiques, qui n'atteignent pas leurs valeurs extrémales aux mêmes instants, doit être appliquée,
- sélectionner les valeurs de S_n et S_p aux couples d'instant maximisant $S_{alt} = K_e.S_p$, ce qui signifie que la sélection ne porte ni sur l'amplitude maximale de variation de la contrainte totale, ni sur l'amplitude maximale de variation de la contrainte linéarisée, mais sur leur effet combiné maximal vis à vis du calcul du facteur d'usage. Toutefois, cette procédure de sélection des instants significatifs dépend de l'expression retenue pour la correction K_e et doit être remise en cause en cas de modification de celle-ci.

Il est enfin à noter que des procédures sont fournies en annexe ZE du RCC-M pour couvrir les cas où une partie du chargement est déterminée par analyse détaillée selon 3.3, et l'autre par analyse simplifiée selon 3.4.

3.6 Cas particulier des singularités géométriques

L'analyse des assemblages à pénétration partielle ou des liaisons emmanchées-soudées, dont la géométrie s'apparente à une fissure fait appel à des facteurs de concentration de contrainte qui peuvent atteindre des valeurs excessivement élevées.

Le RCC-M fait appel à une idée avancée par Peterson en 1943 et développée ensuite par Langer [25]. Elle consiste à déterminer la variation de contrainte à une distance d proche de la pointe de la singularité géométrique. Cette distance est une caractéristique du matériau et est de l'ordre de 0,06 mm. Les bases des critères du RCC-M ont été décrites dans les références [26] et [27]. Les variations de contrainte évaluées à cette distance par une modélisation détaillée sont ensuite:

- soit comparées, comme dans le RCC-M, à des courbes de fatigue spécifiques obtenues expérimentalement,
- soit transformées, comme dans le RCC-MR, en amplitudes de variation de déformation locales en utilisant l'expression de Neuber transcrite sous la forme $\Delta\sigma.\Delta\varepsilon = \text{constante}$. Cette amplitude de déformation peut alors être utilisée pour l'évaluation du facteur d'usage par utilisation des courbes S-N classiques. L'analyse de la singularité géométrique intégrant plusieurs des effets couverts par les facteurs 2 et 20 discutés précédemment, la variation de déformation obtenue est divisée par 1,5 avant comparaison aux courbes de fatigue, ce qui revient à substituer au facteur 2 un facteur réduit à $2/1,5 = 1,33$ appliqué à la courbe expérimentale médiane.

La référence [5] a comparé ces deux procédures et a montré leur cohérence. Des propositions ont également été faites, afin que le degré de pessimisme de l'analyse des différents types de configuration soit équivalent. A cet égard, la méthode du RCC-M doit être complétée sur plusieurs points:

- la définition de courbes de fatigue, définies à deux écarts-types par rapport à la médiane des résultats expérimentaux obtenus,
- la définition d'un critère d'amorçage macroscopique retenant, par exemple, la plus petite des deux valeurs suivantes: une propagation d'amplitude donnée (1 ou 2 mm), et une propagation représentant une faible proportion du ligament (par ex. 0,05 fois celui-ci),
- la réévaluation du pessimisme de cette méthode aux grands nombres de cycles.

4. SURVEILLANCE EN EXPLOITATION ET PRISE EN COMPTE DU RETOUR D'EXPERIENCE

4.1 Prise en compte du retour d'expérience

La pratique nucléaire présente une spécificité importante par rapport à la plupart des installations industrielles, celle de vérifier en permanence, au cours de la durée de vie des matériels les plus importants pour la sûreté, que leurs conditions d'exploitation restent enveloppées par les hypothèses de conception. Cette opération est couverte par les dispositions du code de surveillance en exploitation RSE-M [4], et conduit périodiquement à réexaminer les hypothèses de conception.

Par ailleurs, des essais relativement longs précèdent la mise en service industrielle de l'installation. Ils permettent de détecter des problèmes potentiels difficiles à prévoir au stade de la conception.

C'est ainsi qu'ont notamment été détectés des problèmes [28]:

- de tenue en fatigue de certaines singularités géométriques, des désolidarisations de manchettes thermiques ayant été observées sur les premiers paliers. Ceci a conduit à des améliorations de conception, à la suppression de certaines manchettes, et au développement de règles d'analyse spécifiques à ces zones,
- de vibrations de tuyauteries d'instrumentation insuffisamment supportées, de fatigue de visseries d'internes, ainsi que des phénomènes thermohydrauliques locaux,
- de fatigue thermique consécutive au dysfonctionnement de certains matériels (fuites de robinetterie du circuit d'injection de sécurité, par exemple), qui ont conduit à recommander en service la vigilance sur certains points identifiés comme critiques.

Les quelques problèmes rencontrés en pratique, notamment au cours des phases d'essai qui ont pour objectif de les mettre en évidence, ne doivent pas masquer le fait que les précautions prises ont conduit globalement à un nombre d'incidents très limité, traduisant l'efficacité globale des mesures préventives prises au stade de la conception.

Ces incidents concernent généralement des phénomènes non anticipés, ce qui signifie que là où les précautions de prévention du risque de fatigue ont été appliquées, elles ont généralement été efficaces. Ceci implique que les orientations de progrès souhaitables concernent davantage les critères d'alerte, progressivement affinés suite au retour d'expérience, que le niveau de raffinement des analyses.

4.2 Suivi en exploitation

Outre une surveillance en fonctionnement, normale pour toute installation industrielle, les matériels les plus importants pour la sûreté des chaudières nucléaires font l'objet, en application du chapitre B.6000 du RSE-M, d'une procédure de comptabilisation des situations de fonctionnement, dont l'objectif est de s'assurer "que les marges prescrites par les règles de conception vis à vis des différents dommages mécaniques visés par ces règles, tout particulièrement pour ce qui concerne la fatigue oligocyclique, sont respectées à tout moment".

Si le bilan des résultats de cette comptabilisation fait apparaître des divergences manifestes par rapport au dossier des situations de conception, ce dernier peut être modifié sous réserve que les marges prescrites vis à vis des risques d'endommagement restent vérifiées.

Dans le cas où un risque de dépassement de ces marges apparaissait, il appartient à l'exploitant de réviser les documents techniques d'exploitation de façon à limiter en nombre ou en sévérité les transitoires responsables de ce risque de dépassement, ou de mettre en œuvre des modifications de réglages d'organes de régulation ou d'automatismes.

4.3 Inspections périodiques

Les dispositions relatives au suivi en exploitation des circuits primaires et secondaires principaux des réacteurs nucléaires à eau sous pression de l'arrêté du 26 février 1974 et de la RFS II.3.8 ont été

récemment mises à jour par l'arrêté ministériel du 10 novembre 1999 [29], qui est d'application à dater du 5 février 2000.

Cet arrêté indique notamment que les modalités de visites périodiques et le programme de maintenance préventive doivent prendre en considération:

- les zones dont les études de conception montrent le caractère sensible. S'agissant de la fatigue, ce n'est pas tant le facteur d'usage qui est à considérer que le degré de raffinement de l'analyse qui a conduit à sa détermination,
- les zones dans lesquelles le retour d'expérience montre la nécessité d'un programme particulier,
- les zones dans lesquelles les chargements sont complexes, à moins qu'ils puissent être appréhendés par une instrumentation appropriée et que leur impact sur le matériel ait pu être précisément évalué,
- enfin, un sondage général doit être effectué sur des zones non classées comme sensibles, une attention particulière étant portée aux soudures longitudinales ou présentant des accidents de géométrie.

Les modalités pratiques d'inspection périodiques constituent une part essentielle du code RSE-M, qui comporte, matériel par matériel, les exigences minimales à satisfaire.

4.4 Traitement des indications détectées

Les modalités de traitement des indications détectées à l'occasion des inspections périodiques sont également abordées dans l'arrêté du 10 novembre 1999, et développées en détail dans le code RSE-M.

Une part importante des éléments de décision de réparation ou de maintien en l'état est constituée par la recherche de la nature et de l'origine des défauts détectés, et en particulier l'évaluation de la présomption d'évolution en service de ces défauts. Le choix entre une élimination immédiate et une élimination différée, lorsqu'un report est envisageable au vu des calculs d'innocuité effectués, est notamment guidé par le caractère évolutif ou non de ces défauts.

De même, les tables d'acceptabilité des défauts indiquées dans le RSE-M pour un certain nombre de circuits ont été fondées sur des analyses qui prenaient en compte les risques d'évolution potentielle de ces défauts, compte tenu des analyses de fatigue effectuées à la conception. C'est la raison pour laquelle elles sont particularisées aux différents équipements, certaines zones étant exclues d'une telle démarche lorsque les risques d'évolution ne pouvaient être couverts de manière simple.

Ces tables ne sont pas applicables en visite complète initiale, où il ne serait raisonnable de tolérer que des défauts (en règle générale des défauts de fabrication acceptables au sens des règles de construction industrielles) dont l'évolution au cours de l'ensemble de la vie de l'appareil ne pourrait être que très limité.

La considération des risques d'évolution en service des défauts, tant au niveau des règles d'analyse à la rupture brutale de l'annexe ZG du RCC-M appliquées à la conception, qu'au niveau des critères d'acceptabilité des défauts découverts en exploitation, est une caractéristique plus particulièrement spécifique aux codes nucléaires français, qui considèrent que les défauts les plus dangereux sont ceux qui sont potentiellement évolutifs, notamment par fatigue.

CONCLUSIONS

L'industrie nucléaire a joué un rôle de précurseur en matière de règles détaillées de prévention des différents modes d'endommagement des installations, compte tenu du degré de sûreté attendu de ces dernières. A ce titre, des règles de fatigue détaillées ont été mises en place dès les années 60, et constamment améliorées depuis lors.

Ce risque est pris en compte dès la phase de construction pour décider du niveau de précaution de réalisation à retenir; il fait ensuite l'objet, pour les matériels importants pour la sûreté, ainsi que pour ceux qui sont soumis en service à des sollicitations cycliques significatives, d'une évaluation détaillée qui attache une grande importance aux combinaisons de sollicitations, à la prise en compte du comportement élastoplastique des matériaux et à la vérification, lors de l'exploitation des matériels, de la validité des hypothèses retenues.

Le retour d'expérience d'exploitation conduit à une mise à jour des exigences de conception et de réalisation, à laquelle contribuent également les développements effectués par le constructeur et l'exploitant, ainsi que dans le cadre de collaborations internationales.

Enfin, la surveillance en exploitation est effectuée en prenant en compte ces évaluations et il en va de même des modalités de traitement des indications détectées à l'occasion de cette surveillance.

REFERENCES

- [1] J.B. Vogt "Principes fondamentaux du comportement cyclique et de l'endommagement par fatigue des matériaux métalliques" Journée SFEN-ST2, Paris, 23 Novembre 2000.
- [2] Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, div.2, 1969, ASME.
- [3] RCC-M "Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP ", Edition 2000, Afcen, Paris.
- [4] RSE-M "Règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP", Edition 1997, Afcen, Paris.
- [5] CEC-DG XI Contract B4-3070/95/000876/MAR/C2 "Reevaluation of fatigue analysis criteria" Final Report Framatome EE/S 98.317.
- [6] B.F. Langer "Design-stress basis for pressure vessels", Exp. mech. January 1971.
- [7] L.F. Coffin Jr. "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal". Trans. ASME, Vol. 67, 1954.
- [8] Arrêté et circulaire du 26 février 1974 portant application de la réglementation des appareils à pression aux chaudières nucléaires à eau.
- [9] Dr. W.J. O'Donnell. Private Communication to N.G. Smith (AEA Technology), December 1996.
- [10] J.M. Keisler, O.K. Chopra, W.J. Shack "Statistical models for estimating fatigue strain-life behavior of pressure boundary materials in light water reactor environments" Nucl. Eng. and Design 167 (1996), pp. 129-154.
- [11] J.L. Hechmer "Report on 2 and 20 Design Factors". PVRC WG - Evaluation Methods, ASME Code Section III Sub-group on Fatigue Strength. Minutes, Attachment 2, 26 February 1996.
- [12] M.J. Manjoine, R.E. Tome "Proposed Design criteria for High Cycle Fatigue of Austenitic Stainless Steel" ASME Int. Conf. on Advances in Life Prediction Methods, Book H00255, pp. 51-57, April 18-20, 1983.
- [13] M.J. Manjoine, R.L. Johnson "Development of Fatigue Design Curves for Ferritic Steels up to 700 F (371 C)" ASME Codes and Recent Advances in PVP and Valve Technology, PVP conference Chicago, ASME-PVP- Vol 109, Book H00360, 1986, pp. 83-91.
- [14] NUREG/CR 6260, January 1997.
- [15] L.K. Severud "Background to the elastic creep-fatigue rules of the ASME B&PV code case 1592", Nucl. Eng. and Design 45 (1978), pp. 449-455.ex 141
- [16] RCC-MR "Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires RNR", Edition 1993, Afcen, Paris.
- [17] O. Chopra "Evaluation factors for fatigue S-N curves" PVRC fall meeting, WG on S/N data analysis, United engineering center, New-York, October 10, 1994.
- [18] A.F. Deardorff, J.K. Smith "Evaluation of Conservatism and Environmental Effects in ASME Code, Section III, Class 1 fatigue analysis, SAND 94-0187, August 1994.
- [19] A. Handtschoewercker "Evolutions récentes et en cours des règles d'analyse de la fatigue dans les Codes d'Appareils à Pression" Chaudronnerie-Tôlerie-Tuyauteries industrielles, Mai 1997, pp. 4-22.

- [20] Règle Fondamentale de Sûreté II.3.8 du 8 Juin 1990, relative à la construction et à l'exploitation du circuit secondaire principal.
- [21] PTAN3 "Fondements des règles de prévention de l'endommagement des matériels mécaniques" En préparation, Afcen, Paris.
- [22] J.M. Grandemange, D. Le Roy "Corrections de plasticité dans les analyses de fatigue" Journées AFIAP 1993.
- [23] C. Heng, J.M. Grandemange "Framatome view on the comparison between class 1 and 2 RCC-M piping design rules" WRC Bulletin 361, February 1991.
- [24] C. Heng, A. Pellissier-Tanon "A coherent approach of light water reactor piping analysis" ICPVT-7, Düsseldorf, 1992.
- [25] B.F. Langer "Design of vessels, involving Fatigue" in "Pressure Vessel Engineering Technology" Ed. R.W. Nichols. Applied Science Pub. Ltd. London, 1971, pp. 59-100.
- [26] Y.C. d'Escatha, J.C. Devaux, J.L. Bernard, A. Pellissier-Tanon "A criterion for analysing fatigue crack initiation in geometrical singularities" 4th ICPVT, London, 1980.
- [27] J.L. Bernard, J.M. Vassal, A. Pellissier-Tanon, C. Amzallag "An analysis method for fatigue crack initiation on geometrical singularities" Fitness for purpose in welded construction, Atlanta, May 18-20, 1982.
- [28] C. Faigy "French Nuclear Codes and Operating Feedback". International Conference on Nuclear Engineering, ICONS 5, New Orleans, 1995.
- [29] Arrêté et circulaire du 10 Novembre 1999, relatifs à la surveillance de l'exploitation du circuit primaire principal et des circuits secondaires principaux des réacteurs nucléaires à eau sous pression.