

LES MATÉRIAUX

Table des matières

	Page
Section 1 Objectifs	1
Section 2 Propriétés des matériaux	
2.1 Introduction	3
2.2 Contraintes mécaniques et thermiques	3
2.2.1 Contraintes mécaniques et déformation	3
2.2.2 Contraintes thermiques et déformation	4
2.2.3 Contraintes circonférentielles	6
2.1.4 Contraintes résiduelles	6
2.2.5 Facteurs causant des contraintes mécaniques ou thermiques dans une pièce	6
2.2.6 Conséquences du dépassement des limites de résistance des matériaux	8
2.2.7 Pourquoi les vitesses de réchauffement et de refroidissement sont limitées	8
2.2.8 Pourquoi doit-on s'assurer que les vannes s'ouvrent durant le réchauffement d'un circuit	9
2.3 Transition ductile-fragile	9
2.3.1 Ductilité	9
2.3.2 Fragilité	9
2.3.3 Température de transition à la ductilité nulle	10
2.3.4 Différences entre le comportement ductile et la rupture fragile	11
2.3.5 Limites d'utilisation des matériaux possédant une température de transition ductile-fragile	11
2.4 Fluage	12
2.4.1 Pourquoi un arbre de grande taille se déforme-t-il lorsqu'il est au repos	12
2.4.2 Pourquoi le laminage d'un arbre de grande taille avant l'utilisation réduit la déformation	13
2.5 Fatigue	13
2.5.1 Mécanismes de défaillance dus à la fatigue causée par l'écrouissage	13
2.6 Érosion	13
2.6.1 Défaillance en surface due à l'usure ou à l'érosion des matériaux	13
2.6.2 Abrasion	14
2.6.3 Adhésion	15
2.6.4 Usure de contact	15
Questions de révision	16
Section 3 Corrosion	
3.1 Introduction	19
3.2 Types de corrosion	19

3.2.1	Corrosion uniforme	19
3.2.2	Corrosion galvanique	20
3.2.3	Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse	22
3.2.4	Fissuration par corrosion sous contrainte (FCC)	23
3.2.5	Corrosion-érosion	23
3.2.6	Corrosion induite microbiologiquement (CIM)	23
3.3	Systèmes en aciers au carbone	24
3.3.1	Contrôle du pH dans les systèmes en aciers au carbone	24
3.3.2	Importance du contrôle de l'oxygène dissous et méthodes de contrôle courantes	27
3.4	Importance du contrôle de la conductivité et méthodes de contrôle courantes	29
3.5	Systèmes en aciers inoxydables	31
3.5.1	FCC dans le modérateur	31
3.5.2	FCC dans le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité et le système de contrôle de la zone liquide	31
3.5.3	Contrôle du pH dans les systèmes en aciers inoxydables et méthodes de contrôle courantes	32
3.5.4	Contrôle de la conductivité dans les systèmes en aciers inoxydables et méthodes de contrôle courantes	34
3.6	Entartrage	
3.6.1	Mécanismes de formation et conséquences néfastes de la formation de tartre sur les tubes des générateurs de vapeur – Méthodes visant à réduire le tartre au minimum	35
3.6.2	Effets néfastes des dépôts de boues et de la formation de tartre	36
	Questions de révision	38
Section 4 Tubes de force et grappes de combustible		
4.1	Introduction	39
4.2	Effets du rayonnement sur les matériaux courants	39
4.2.1	Huiles et graisses	39
4.2.2	Plastiques	40
4.2.3	Métaux	40
4.2.4	Aciers au carbone	41
4.2.5	Alliages de zirconium	41
4.2.6	Béton	41
4.2.7	Facteurs ayant une incidence sur le fluage dans les tubes de force	42
4.3	Fragilisation par l'hydrogène, fissuration par hydruration retardée, formation de boursouffures dans les tubes de force et facteurs contributifs	45
4.4	Réduire au minimum la fissuration par hydruration retardée durant le démarrage et le refroidissement de la tranche	51

Questions de révision

53

1.0 OBJECTIFS

Le cours porte sur les sujets suivants relatifs aux propriétés mécaniques :

- Contraintes mécaniques et thermiques
- Corrosion
- Tubes de force et grappes de combustible

Au terme de la formation, le participant sera en mesure de :

Contraintes mécaniques et thermiques

- définir les expressions suivantes : contrainte mécanique et déformation, contrainte circonférentielle, dilatation thermique, dilatation thermique différentielle, choc thermique et contrainte résiduelle
- décrire les facteurs qui causent des contraintes mécaniques et thermiques dans une pièce
- expliquer les conséquences d'un dépassement des limites de résistance dans les matériaux
- expliquer pourquoi les vitesses de réchauffement et de refroidissement sont limitées
- définir les propriétés suivantes des matériaux : ductilité, fragilité et transition à la ductilité nulle
- expliquer les différences entre la rupture ductile et la rupture fragile
- expliquer pourquoi un matériau possédant une température de transition ductile-fragile a des limites d'utilisation relatives à la température
- définir le phénomène du fluage dans les matériaux
- expliquer pourquoi un arbre de grande taille se déforme lorsqu'il est au repos
- expliquer pourquoi le laminage d'un arbre de grande taille avant l'opération réduit la déformation
- décrire le mode de défaillance par fatigue et l'écrouissage

Corrosion

- décrire le phénomène d'érosion des matériaux
- décrire le phénomène d'usure ou de défaillance en surface des matériaux
- pour un système d'usine donné et certains paramètres chimiques dans leur plage de fonctionnement normale, expliquer les conséquences d'un fonctionnement hors de cette plage normale et les méthodes de contrôle employées

- décrire les types de corrosion suivants : uniforme, galvanique, corrosion par piqûres et cavernuse, fissuration par corrosion sous contrainte, érosion et corrosion induite microbiologiquement
- expliquer l'importance du contrôle du pH dans les systèmes en aciers au carbone, y compris l'importance de la couche de magnétite, et décrire les méthodes couramment employées pour assurer un contrôle adéquat
- expliquer l'importance du contrôle de l'oxygène dissous dans les systèmes en aciers au carbone, et décrire les méthodes courantes employées pour assurer un contrôle adéquat
- expliquer l'importance du contrôle de la conductivité et décrire les méthodes courantes employées pour assurer un contrôle adéquat
- définir l'expression fissuration par corrosion sous contrainte (FCC), et préciser les conditions requises pour que la FCC se produise
- expliquer l'importance du contrôle du pH dans les systèmes basés sur les aciers inoxydables et décrire les méthodes couramment employées pour assurer un contrôle adéquat
- expliquer l'importance du contrôle de la conductivité et décrire les méthodes couramment employées pour assurer un contrôle adéquat
- expliquer comment le tartre se forme sur les tubes des générateurs de vapeur, préciser les conséquences néfastes de la formation de tartre ainsi que les méthodes employées pour réduire au minimum la formation de tartre

Tubes de force et grappes de combustible

- préciser les effets du rayonnement sur les matériaux : huiles et graisses, plastiques, métaux et béton
- décrire les causes du fluage dans les tubes de force
- décrire les processus de fragilisation par l'hydrogène et de fissuration par hydruration retardée, de cloquage des tubes de force, ainsi que les facteurs qui les affectent
- expliquer comment on peut agir sur les cycles thermiques et la diminution de la pression du transport thermique pour réduire au minimum le potentiel de fissuration par hydruration retardée dans les tubes de force au démarrage et pendant le refroidissement.

2.0 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

2.1 INTRODUCTION

Différents types de matériaux sont nécessaires pour la conception et l'exploitation des centrales nucléaires. Tous les matériaux peuvent connaître des défaillances à cause de forces externes ou internes, comme les contraintes mécaniques et thermiques, ou à cause de phénomènes connexes comme le fluage, la fatigue et l'érosion. Dans ce module, nous allons examiner les principales causes et conséquences de la défaillance mécanique de matériaux courants sur lesquels l'exploitant peut exercer un certain contrôle.

2.2 CONTRAINTES MÉCANIQUES ET THERMIQUES

Le terme contrainte, ou stress, est employé couramment aujourd'hui, mais il possède un sens technique bien précis, et il en est de même pour le terme déformation. La déformation est un effet qui résulte de la contrainte. Les définitions de ces termes et d'autres termes connexes sont indiquées ci-après.

2.2.1 Contraintes mécaniques et déformation

Lorsqu'une charge ou une force est appliquée à un matériau, ce matériau est assujéti à une contrainte définie comme étant la force appliquée sur une unité de surface. (Cette notion nous permet d'ignorer la taille de l'unité tout en examinant les effets de la force sur l'état physique de la pièce.) Par exemple, une force externe due à la pesanteur est exercée sur tous les matériaux.

Il existe trois types de contraintes :

- Contrainte de traction qui tend à allonger un matériau.
Exemple : un ressort muni d'un poids attaché à l'une de ses extrémités.
- Contrainte de compression qui tend à comprimer un matériau.
Exemple : un cric d'automobile soumis à une charge.
- Contraintes de cisaillement qui résultent de l'application d'une charge transversale. Exemple : contrainte exercée sur un arbre qui est mal aligné.

Les trois types de contraintes sont illustrées à la figure 1.

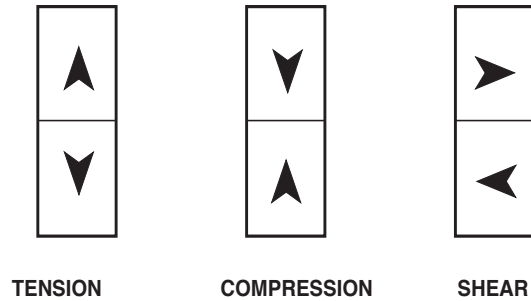


Figure 1
Types de contraintes

TENSION : TENSION

COMPRESSION : COMPRESSION

SHEAR : CISAILLEMENT

La déformation est l'effet résultant de la contrainte. Par exemple, la déformation est souvent mesurée comme étant le % d'allongement ou le changement relatif de longueur d'une pièce sur laquelle une force de traction a été exercée. Dans de nombreux matériaux, les contraintes appliquées peuvent avoir un ou plusieurs des effets suivants, selon l'importance de la contrainte :

- Lorsqu'il est assujéti à une contrainte relativement faible, le matériau subit une déformation élastique, et retourne à son état initial après l'élimination de la contrainte.
- Lorsqu'il est assujéti à des niveaux de contrainte modérés, le matériau atteint sa limite d'élasticité, ou limite apparente d'élasticité et commence à subir une déformation plastique. Il ne retournera pas à son état initial, mais subira une déformation permanente.
- Lorsqu'il est assujéti à des niveaux de contrainte relativement élevés, le matériau connaît une défaillance ou une rupture parce que sa limite conventionnelle de proportionnalité a été dépassée.

2.2.2 Contraintes thermiques et déformation

Les matériaux subissent également des contraintes à cause des différences de température. Celles-ci peuvent entraîner des changements dans les dimensions des pièces. Lorsqu'une pièce résiste à un changement de dimensions, il en résulte une contrainte thermique. Les

changements dans les dimensions d'une unité peuvent être causés par des contraintes externes ou par des gradients de température internes, ou les deux. Par exemple, une contrainte externe peut être appliquée à une poutre dont les deux extrémités sont coulées dans le béton. Lorsque la poutre est chauffée ou refroidie de manière importante, on observera la présence de contraintes de compression ou de traction.

Dans les cas où survient une différence de température ou un gradient à l'intérieur du matériau, les forces générées seront internes.

Les parties les plus chaudes du matériau subissent généralement une dilatation plus importante que les parties plus froides, ce qui génère des contraintes de compression dans les parties plus chaudes et des contraintes de tension dans les parties plus froides.

Il arrive parfois, contrairement au cas précité, qu'on observe alors une contrainte thermique réelle. Certains processus sont en cause dans les contraintes thermiques, notamment :

- La dilatation thermique (ou l'allongement), dans la plupart des matériaux, résulte d'une augmentation de la température. L'ampleur de la dilatation dépend du changement de température, de la température elle-même, de la longueur de la pièce et des matériaux qui la compose.
- La dilatation thermique différentielle survient lorsqu'il y a une différence de température ou un gradient entre deux points d'une même pièce en métal. On qualifie cette dilatation de différentielle parce que la plupart des métaux se dilatent lorsque la température augmente. Si l'augmentation (ou la diminution) de température n'est pas la même dans les différentes parties d'une même pièce, ces différentes parties ne subiront pas la même dilatation. Dans ce cas, les contraintes de compression et de traction entraîneront le pliage de la pièce, tel qu'indiqué à la figure 2.

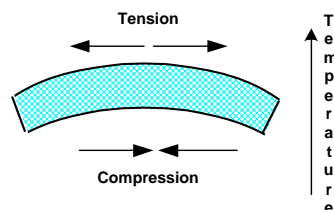


Figure 2

Pliage dû à la dilatation thermique différentielle

Tension : tension

Compression : compression

Temperature : température

- Le choc thermique est une contrainte interne qui résulte du réchauffement ou du refroidissement rapide d'une pièce. Dans le cas du réchauffement, les contraintes de compression élevées près de la surface de la pièce peuvent causer une fissuration interne alors que dans le cas du refroidissement, des contraintes de traction élevées apparaissant à la surface de la pièce pourraient donner lieu à une fissuration externe.

2.2.3 Contraintes circonférentielles

La contrainte circonférentielle dans une conduite est une contrainte qui s'oppose à la dilatation de la conduite lorsque le fluide contenu à l'intérieur de la conduite est sous pression. En termes plus techniques, il s'agit de la contrainte à l'intérieur de la paroi d'une conduite qui agit de manière circonférentielle dans un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal de la conduite et qui est produite par la pression exercée par le fluide sur la conduite.

2.2.4 Contraintes résiduelles

Au cours de la fabrication, de l'installation ou de l'entretien, le matériau peut être laissé dans un état tel que des contraintes agissent de manière permanente à l'intérieur du matériau. La contrainte résiduelle est appliquée de manière continue à l'intérieur du matériau durant toute la durée de vie de l'équipement. On peut pratiquer des ouvertures à la perceuse, souder ou plier les pièces pour appliquer des contraintes résiduelles dans un matériau. Une définition plus officielle suivra. La contrainte résiduelle est une tension ou une compression, qui existe dans le substrat du matériau en l'absence de l'application de charges externes (force appliquée, déplacement d'un gradient thermique).

2.2.5 Facteurs causant des contraintes mécaniques ou thermiques dans une pièce

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, la plupart des matériaux soumis à une contrainte ont tendance à se déformer de manière réversible (déformation élastique) à des niveaux de contrainte relativement faibles, alors que ceux qui se déforment de manière permanente (déformation plastique) ont généralement été soumis à des contraintes élevées dépassant leur limite d'élasticité. Ces notions, ainsi

que d'autres notions seront examinées plus loin et sont illustrées à la figure 3.

Lorsque la contrainte augmente (force/surface), le matériau se déforme et subit des déformations plus importantes, jusqu'à ce que le matériau atteigne sa limite d'élasticité. Toute augmentation ultérieure de la contrainte appliquée peut donner lieu à une déformation plastique ou irréversible. À un certain moment, le matériau commence à se fissurer, puis la contrainte diminue.

La figure 3 illustre l'effet de l'application d'une contrainte de traction mécanique, mais il convient de noter que les matériaux répondent également de manière similaire à d'autres modes de contraintes appliquées.

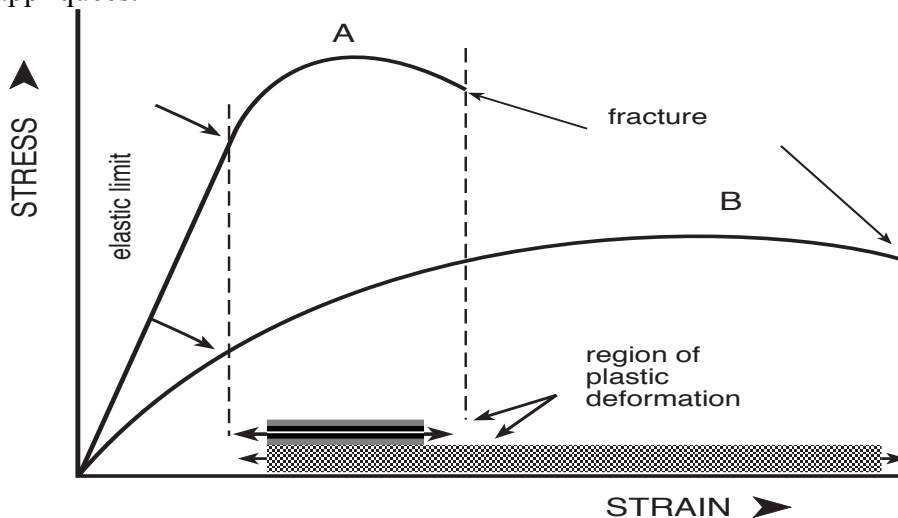


Figure 3
Zones de déformation plastique

STRESS : CONTRAINTE
STRAIN : DÉFORMATION
ELASTIC LIMIT : LIMITE D'ÉLASTICITÉ
FRACTURE : FISSURE
REGION OF PLASTIC DEFORMATION : ZONE DE DÉFORMATION PLASTIQUE

Tous les matériaux à la surface de la Terre sont assujettis à des contraintes mécaniques causées par la force de gravité. La pesanteur est également responsable des charges de compression sur les supports de machines et du fluage potentiel des grands arbres horizontaux (nous examinerons ce sujet plus loin).

D'autres contraintes mécaniques sont exercées dans les machines tournantes à cause de la force centrifuge et des charges appliquées sur les bagues de butée.

Les contraintes thermiques sont causées par le réchauffement ou le refroidissement imputable aux différences de température qui surviennent à cause du flux de chaleur vers l'intérieur ou l'extérieur d'une pièce.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les dimensions d'une pièce dépendent de l'élévation de température et augmentent par la même occasion. Il en résulte que la surface de la pièce chauffée se dilate davantage que l'intérieur de la pièce, ce qui crée des contraintes de compression près de la surface et des contraintes de traction et de cisaillement à l'intérieur de la pièce. Bien que les tubes d'échangeurs thermiques soient également soumis à des contraintes thermiques, les effets sont moins importants parce que la chute de température d'un bout à l'autre de l'échangeur est généralement très faible.

Des contraintes thermiques et mécaniques peuvent résulter d'un changement soudain dans la pression d'un circuit de fluide (gaz ou liquide). La pression est une mesure de la force exercée par un fluide dont l'écoulement est restreint par une surface solide (par exemple, l'eau d'alimentation des générateurs de vapeur ou la vapeur dans une conduite).

À l'intérieur de la conduite qui est exposée à l'atmosphère, la pression manométrique est une mesure des forces de traction exercées par le fluide sur la conduite.

Une chute soudaine de pression peut laisser supposer une rupture de pipeline potentiellement catastrophique. Si l'écoulement du fluide s'arrête soudainement pour une quelconque raison, on observera une augmentation presque instantanée de la pression et de la température du circuit, ce qui pourrait causer une défaillance due aux contraintes mécaniques et thermiques.

2.2.6 Conséquences du dépassement des limites de résistance des matériaux

Lorsque les matériaux sont soumis à des contraintes qui s'accroissent, les déformations augmentent elles aussi en passant par différentes étapes, où l'effet est réversible, puis irréversible et enfin, où il y a rupture totale. En résumé, une pièce risque de ne plus être utile longtemps avant que la rupture se produise parce que la déformation

plastique est irréversible et, par conséquent, la pièce ne reviendra jamais à son état initial.

Avec l'expérience, les concepteurs ont appris à connaître les relations qui existent entre les contraintes, les déformations, la température et les conditions de fonctionnement. Forts de ces connaissances, ils sont en mesure de fixer des limites de résistance afin de permettre le fonctionnement et l'utilisation d'une pièce pendant un temps acceptable. Cependant, le dépassement de la limite de résistance peut entraîner une défaillance prématurée de la pièce, avec toutes les conséquences qui en découlent.

2.2.7 Pourquoi les vitesses de réchauffement et de refroidissement sont limitées

Des contraintes thermiques apparaissent dans un matériau lorsqu'on est en présence de gradients de température et des gradients de température sont générés lorsqu'on chauffe ou que l'on refroidit une pièce.

Comme nous l'avons fait remarquer précédemment, le réchauffement ou le refroidissement rapide d'une pièce génère d'importants gradients de température en raison des vitesses différentielles de dilatation thermique. Pour éviter une rupture interne ou externe de la pièce, les vitesses de réchauffement et de refroidissement sont conçues pour limiter les différences de température et les déformations qui résultent des contraintes thermiques de manière à les maintenir à des niveaux acceptables.

2.2.8 Pourquoi doit-on s'assurer que les vannes s'ouvrent durant le réchauffement d'un circuit

Au cours du réchauffement d'un circuit, de grandes différences de température peuvent être générées de part et d'autre d'une vanne fermée. Les contraintes thermiques qui naissent en travers de la vanne peuvent entraîner une défaillance de celle-ci à cause des mécanismes en jeu. Si les vannes ne peuvent pas s'ouvrir durant le réchauffement du circuit, l'augmentation du volume occupé par l'eau confinée dans les conduites, les réservoirs et d'autres cuves, qui constituent le confinement solide, provoquera une augmentation de pression et une élévation de température. La contrainte mécanique additionnelle résultante ou l'ouverture des vannes de détente sont des conséquences non souhaitables.

2.3 TRANSITION DUCTILE-FRAGILE

2.3.1 Ductilité

La ductilité est une mesure de la capacité d'un corps à se déformer ou à subir une déformation plastique sous l'effet d'une contrainte de cisaillement ou de traction sans se rompre. La déformation plastique est irréversible. Cela signifie que des changements sont survenus dans la structure fondamentale de la pièce au cours de la déformation. Pour la plupart des matériaux, la ductilité augmente avec la température.

La dureté, ou la résistance d'un matériau à la pénétration d'un objet tranchant est une propriété associée de près à la ductilité. Les matériaux ductiles sont habituellement relativement tendres, et les matériaux durs sont souvent fragiles (manquent de ductilité). Les diamants et l'alundon sont des exemples de matériaux très durs, et le talc est un exemple de matériau très tendre.

Le cuivre, par ailleurs, est un métal relativement ductile, bien qu'il soit tendre. On peut le plier plusieurs fois sans qu'il se rompe mais, comme nous l'a appris l'expérience, s'il est plié trop souvent, il devient écroui puis fragile, et se rompt alors facilement.

La ténacité est une propriété semblable qui combine la ductilité et la résistance. Le cuir est un excellent exemple de matériau ayant une bonne ténacité. De façon générale, les métaux ductiles ont également une bonne ténacité en général.

2.3.2 Fragilité

Les métaux fragiles ont une capacité de déformation plastique relativement faible avant la rupture. Cela signifie qu'une pièce fragile soumise à une charge excessive de contraintes peut connaître une défaillance soudaine et potentiellement catastrophique sans allongement initial ou déformation. Moins un métal est ductile, plus il sera fragile.

2.3.3 Température de transition à la ductilité nulle

Certains métaux, comme les aciers au carbone, de même que certains plastiques subissent une transition plutôt brusque du comportement ductile au comportement fragile lorsque la température baisse. Une façon de caractériser cette propriété consiste à mesurer l'énergie absorbée par le matériau au point de rupture en fonction de la température.

La température de transition à la ductilité nulle est la température à laquelle l'énergie requise pour causer la rupture est égale à la moitié de la différence entre les énergies requises pour la ductilité et pour la rupture fragile. Cette notion est illustrée à la figure 4.

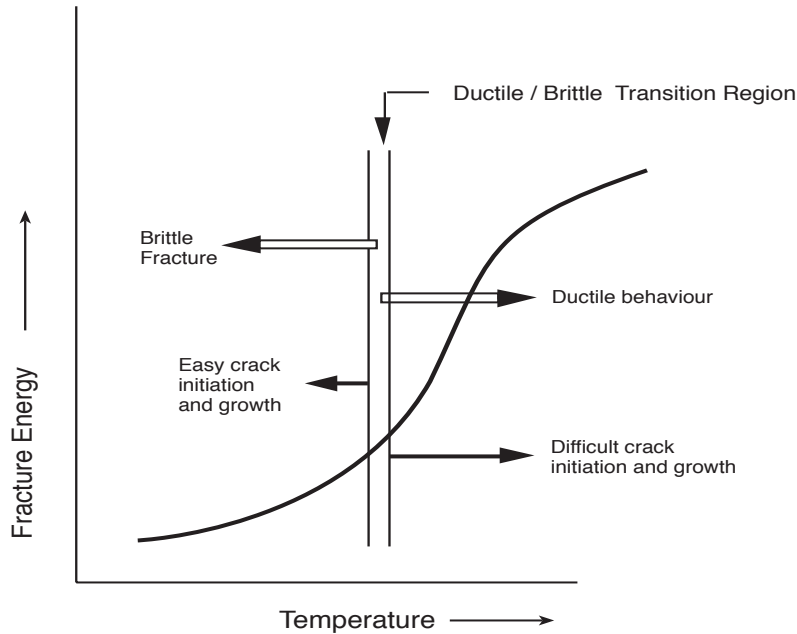


Figure 4
Température de transition à la ductilité nulle

Fracture Energy : Énergie de rupture

Temperature : Température

Ductile / Brittle Transition Region : Zone de transition ductile-fragile

Brittle Fracture : Rupture fragile

Easy crack initiation and growth : Amorçage et propagation faciles de fissure

Difficult crack initiation and growth : Amorçage et propagation difficiles de fissure

Ductile behaviour : Comportement ductile

Les métaux qui possèdent cette propriété sont reconnus comme ayant une sensibilité particulière à l'entaille, étant donné que les ruptures risquent particulièrement de se produire dans les zones de contraintes élevées, comme celles causées par une entaille.

Aux températures inférieures à la température de transition, la rupture est fragile, et l'amorçage et la propagation de fissures sont faciles.

Aux températures supérieures à la température de transition, le matériau est ductile, et l'amorçage et la propagation de fissures sont difficiles. À des

températures proches de la température de transition, les fissures risquent de se propager rapidement.

2.3.4 Différences entre le comportement ductile et la rupture fragile

Le tableau 1 résume les différences entre la rupture fragile et la rupture ductile (précédée par une déformation plastique appréciable) :

De façon générale, la rupture ductile est le mode de défaillance le plus souhaitable parce qu'il est précédé d'une déformation plastique appréciable avant la rupture; cette déformation, si l'on en tient compte, constitue un avertissement précoce à l'effet qu'une rupture est imminente.

Caractéristiques d'une rupture ductile	Caractéristiques d'une rupture fragile
D'abord, on observe un processus de déformation au cours duquel le matériau se déchire lentement avec une grande dépense d'énergie.	Comprend peu ou pas de déformation du matériau.
La propagation de fissures est un processus lent. On observe une déformation plastique importante avant et pendant la propagation des fissures.	La propagation de fissures est rapide (environ 2000 m/s). (La rupture fragile n'est possible que lorsque les fissures se propagent à des vitesses élevées.)
La fissure se propage à travers les grains (propagation transgranulaire) et l'aspect de la fissure est le suivant : elle est grise et fibreuse.	La fissure se propage le long des joints de grain (propagation intergranulaire) et confère à la surface de rupture un aspect cristallin brillant ou granulaire.

Tableau 1
Caractéristiques de la rupture ductile et de la rupture fragile

2.3.5 Limites d'utilisation des matériaux possédant une température de transition ductile-fragile

De toute évidence, la sécurité et l'intégrité d'un appareil reposent sur le maintien de tous les matériaux à une température supérieure à la température de transition à la ductilité nulle.

Lorsque cela est impossible, comme lors de l'utilisation de bouchons de glace, la température des conduites dans la zone du bouchon sera de beaucoup inférieure à la température de transition de l'acier au carbone.

On doit prendre toutes les précautions possibles pour éviter les chocs mécaniques et thermiques dans la zone du bouchon. Les mêmes précautions doivent être prises lorsque des travaux, pour quelque raison que ce soit, sont effectués à une température inférieure à la température de transition.

La turbine et l'arbre du générateur de vapeur possèdent des températures de transition dans la plage de 90 à 100 °C. Afin d'éviter la rupture fragile due aux contraintes thermiques, les arbres de turbine et du générateur de vapeur sont préchauffés de la manière suivante : on fait tourner l'arbre lentement, ce qui répartit uniformément les contraintes.

2.4 FLUAGE

Le fluage est une déformation permanente ou irréversible, en fonction du temps, d'un matériau soumis à des charges continues. Si la déformation d'un matériau n'est pas gérée adéquatement, des fissures et une rupture permanente pourraient se produire. Voici des exemples de conditions dans lesquelles des métaux sont assujettis à une charge continue :

- Un arbre de turbine stationnaire qui supporte son propre poids (attraction gravitationnelle)
- Les parois d'une cuve ou de conduites, par exemple des tubes de force dans un réacteur CANDU, qui fonctionnent sous pression (force de pression)
- Les aubes d'un rotor de turbine (force centrifuge)
- Les câbles contenus dans des poutres en béton précontraint (force de traction imposée)
- Ligne aérienne de transport d'électricité (attraction gravitationnelle)

Pour un matériau donné, la vitesse de fluage augmentera dans les conditions suivantes :

- Un accroissement des contraintes appliquées
- Une élévation de température
- Un accroissement des flux de neutrons (s'il y a lieu) conjugué à des températures d'utilisation plus élevées.

Habituellement, les dommages causés par une irradiation par les neutrons tendent à durcir le matériau, mais à des températures élevées, l'accroissement de la ductilité en fonction de la température compense

largement le processus de durcissement normal dans un champ neutronique.

2.4.1 Pourquoi un arbre de grande taille se déforme-t-il lorsqu'il est au repos

La force de gravité exerce une charge constante sur les arbres de turbines, qu'ils soient au repos ou en rotation. Cette contrainte s'exerce toujours vers le bas, vers le centre de la terre. Lorsque le rotor est stationnaire, le métal subit une contrainte dans une seule direction et tend à s'affaisser. Au départ, l'arbre de turbine subit une contrainte inélastique en fonction du temps.

En bout de ligne, l'affaissement devient irréversible et le fluage résultant peut entraîner la présence de contraintes additionnelles ou de vibrations sur les paliers et risque de provoquer la défaillance de la turbine.

2.4.2 Pourquoi le laminage d'un arbre de grande taille avant l'utilisation réduit la déformation

Le laminage d'un arbre répartit la force de pesanteur exercée sur le métal constituant l'arbre et réduit ou élimine les effets de la contrainte inélastique et l'affaissement. Si la turbine est stationnaire pendant une longue période, la contrainte non répartie peut donner lieu au fluage, qui est irréversible. Pour cette raison, les turbines doivent être laminées régulièrement.

2.5 FATIGUE

2.5.1 Mécanismes de défaillance dus à la fatigue causée par l'écrouissage

La fatigue est un phénomène associé à l'écrouissage des matériaux, et est causée par des charges variables ou répétées qui ont pour résultat une fragilité accrue et une durée de vie en service réduite. La fatigue est un phénomène propre aux matériaux ductiles, mais la défaillance finale est rapide et caractéristique de la rupture fragile.

Le temps qui s'écoule avant que survienne une défaillance par fatigue ne peut être prévu avec exactitude, mais on sait que les conditions suivantes donnent lieu à l'écrouissage, qui mène à la fatigue :

- Contraintes relativement importantes et variables
- Un nombre suffisamment grand de cycles de contraintes

La défaillance par rupture due à la fatigue survient souvent lorsque des contraintes relativement faibles sont appliquées, et qu'elles sont de beaucoup inférieures aux charges nominales spécifiées. Les contraintes peuvent être mécaniques, thermiques ou les deux; il peut s'agir en

alternance de contraintes de tension ou de compression, ou simplement d'une alternance entre des valeurs de contrainte élevées et faibles.

Le meilleur moyen d'assurer une durée de vie en service raisonnable pour les pièces soumises à ce genre de contraintes consiste à s'assurer que les égratignures et d'autres imperfections de surface sont enlevées par polissage et, dans la mesure du possible, par traitement thermique, ce qui élimine les déformations internes.

Les seules méthodes fiables pour vérifier les progrès de la fatigue sont les examens visuels, les examens par rayons X ou par ultrasons des fissures en surface et d'autres fissures sur les pièces sujettes à l'écroutissage.

2.6 ÉROSION

2.6.1 Défaillance en surface due à l'usure ou à l'érosion des matériaux

La défaillance en surface est la perte de matière d'une pièce à cause de la corrosion ou de l'usure. Les principales causes et mécanismes mécaniques d'usure seront examinés dans cette partie.

Les principales causes de défaillance par usure sont l'abrasion, l'adhésion et l'usure de contact. La défaillance due à l'usure est beaucoup moins problématique si les surfaces sont entièrement lisses. Malheureusement, même les surfaces les mieux polies possèdent des imperfections microscopiques, avec des points élevés (bosses) et des points plus bas (creux). La charge appliquée n'est pas uniformément répartie mais tend à se concentrer sur les bosses. Cela signifie que les niveaux de contrainte sur les bosses peuvent être importants et dépasser les limites de conception.

La figure 5 illustre trois mécanismes d'abrasion, d'adhésion et d'usure de contact. Les trois mécanismes dépendent du mouvement relatif des surfaces les unes par rapport aux autres.

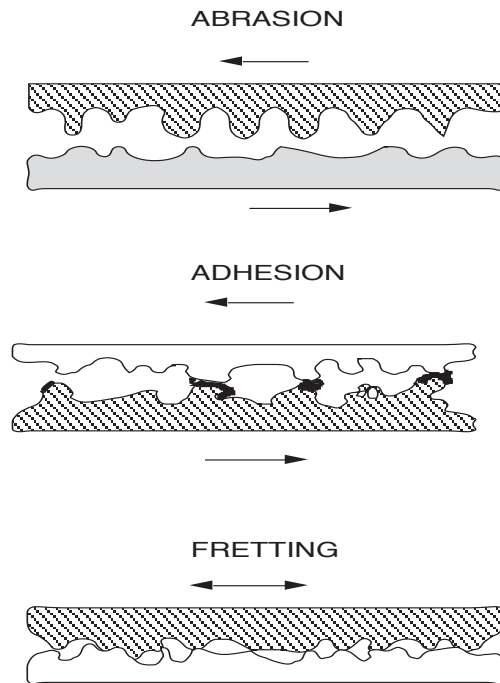


Figure 5
Types d'usure de surface

ABRASION : ABRASION

ADHESION : ADHÉSION

FRETTING : USURE DE CONTACT

2.6.2 Abrasion

L'abrasion est le gougeage microscopique d'une surface plus tendre par les bosses d'une surface plus dure en mouvement, ou par des particules piégées entre des surfaces en mouvement. Les particules peuvent provenir de l'extérieur et avoir été forcées dans le système, ou encore être des morceaux brisés de bosses d'une autre surface.

La filtration de particules dures recueillies dans un lubrifiant en recirculation réduit les effets de l'abrasion sur les joints et les dispositifs d'étanchéité.

Les pièces en mouvement dans des boues et des circuits de gaz/liquides sont également sujettes à l'abrasion. Les joints de conception spéciale et l'entretien régulier sont importants pour réduire au minimum l'abrasion dans ces circuits.

La cavitation provoque également l'érosion des vannes et des pompes. Des contraintes très élevées sont causées lorsque les bulles de vapeur éclatent, ce qui cause d'abord une fragilisation, puis mène à la formation de piqûres de corrosion et de cavités.

2.6.3 Adhésion

L'adhésion est un processus de défaillance en surface par lequel les bosses des pièces de métal sont fusionnées ou soudées ensemble au niveau microscopique, et où il y a ensuite enlèvement des particules soudées à cause du mouvement relatif des pièces les unes par rapport aux autres.

Les surfaces relativement rugueuses et tendres sont particulièrement sujettes à ce type de défaillance.

Pour éviter ce type de défaillance, des périodes de rodage sont spécifiées pour les nouvelles machines ou nouvelles pièces – on évite alors les charges élevées et l'on veille à lubrifier adéquatement les pièces pour s'assurer que la réduction de la rugosité de la surface est bien contrôlée.

2.6.4 Usure de contact

L'usure de contact est habituellement associée à la corrosion et se produit lorsque des produits de corrosion, comme les oxydes, s'accumulent entre deux surfaces par petits déplacements, suivant un mouvement périodique les unes par rapport aux autres. Les oxydes sont très durs et amplifient le processus d'usure.

Ce type de corrosion en surface se produit fréquemment dans les conduites et les échangeurs de chaleur, où même une petite vibration peut lancer le processus d'usure de contact.

QUESTIONS DE RÉVISION

CONTRAINTES MÉCANIQUES ET THERMIQUES

1. Définir les termes suivants.
 - Contrainte
 - Déformation
 - Dilatation thermique
 - Dilatation thermique différentielle
 - Contrainte circonférentielle
 - Contrainte résiduelle
2. Donner quatre exemples de forces mécaniques qui exercent des contraintes sur l'équipement dans une centrale électrique.
3. Un réservoir renfermant du gaz subit une baisse de pression rapide. Cette baisse de pression provoque des contraintes thermiques dans les parois du réservoir. Expliquer brièvement ce phénomène.
4. Il existe des limites d'utilisation relatives à la vitesse de réchauffement ou de refroidissement de l'équipement durant le démarrage ou la mise à l'arrêt des centrales. Expliquer les conséquences du dépassement de ces limites.
5. Définir les termes suivants.
 - Ductilité
 - Fragilité
 - Transition à la ductilité nulle
6. Il existe deux grands types de rupture des matériaux : la rupture ductile et la rupture fragile. Décrire la différence entre les deux.
7. Un matériau qui possède une température de transition ductile-fragile aura des limites d'utilisation. Préciser deux limites courantes et expliquer comment elles protègent le matériau.
8. Définir le terme fluage.
9. Expliquer pourquoi le rotor du groupe turbo-alternateur est parfois mis en rotation durant une mise à l'arrêt.

10. Avant le démarrage du groupe turbo-alternateur après une mise à l'arrêt, on le place sur une machine tournante pendant un certain nombre d'heures. Expliquer pourquoi il s'agit là d'une pratique normalisée.
11. Décrire comment les composants métalliques subissent une défaillance à cause du mécanisme appelé fatigue.
12. Il existe trois grands mécanismes à l'origine de la défaillance en surface. Mentionner les trois méthodes et les expliquer brièvement.

CETTE PAGE EST LAISSÉE BLANCHE INTENTIONNELLEMENT

3.0 CORROSION

3.1 INTRODUCTION

Presque tous les métaux, à l'exception des métaux nobles comme l'or, l'argent et, plus rarement, le cuivre, sont présents dans la nature en combinaison chimique avec des éléments non métalliques, c'est-à-dire qu'ils transfèrent ou partagent des électrons avec d'autres éléments. Les minerais ainsi constitués par des combinaisons chimiques sont souvent différents les uns des autres, mais dans leurs conditions géologiques d'origine, ils sont dans un état stable.

La corrosion est la combinaison non souhaitable de processus par lesquels les métaux tendent à se lier chimiquement avec d'autres matériaux en perdant ou en partageant des électrons avec d'autres éléments.

La tendance chimique des métaux à former des composés par des réactions chimiques n'est pas toujours souhaitable. Par exemple, comme nous le verrons plus loin, les aciers au carbone (aciers doux) peuvent réagir avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui protège l'acier contre la corrosion.

3.2 TYPES DE CORROSION

Les types de corrosion courants sont examinés ci-après.

3.2.1 Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'éléments structuraux qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est Fe_3O_4 .

La magnétite forme une couche protectrice qui diminue la vitesse de corrosion. La couche de magnétite est constituée de cristaux noirs miniatures comprimés en une couche dense et impénétrable.

La formation de cette couche de protection dépend du pH. Pour un faible pH (acidité élevée), aucune couche de protection ne se forme, et l'acier se dissout rapidement. À un pH élevé, > 12 , la couche de magnétite est plus stable et la rouille relativement poreuse entraîne une corrosion rapide. La rouille est une autre forme hydratée d'oxyde de fer qui est poreux et qui

tend à être non cristallin (amorphe) et possède la formule générale suivante : $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.

L'effet du pH sur la corrosion uniforme et d'autres types de corrosion sur certains matériaux courants est examiné ci-après :

- Comme nous l'avons mentionné plus tôt, la vitesse de corrosion des aciers au carbone est minimale pour un pH de 10 à 12.
- De nombreux métaux communs, comme ceux contenus dans les aciers, ainsi que l'aluminium et le magnésium sont sujets à l'attaque acide lorsque le pH est faible.
- Les alliages en zirconium possèdent une grande résistance à la corrosion par les solutions acides et les solutions alcalines jusqu'à un pH de 12.
- Un pH presque neutre est le meilleur pH pour les aciers inoxydables et les alliages de carbone, et il est absolument essentiel pour l'aluminium.
- Les alliages de nickel comme le monel et l'inconel exigent un milieu à pH élevé.

L'addition de produits chimiques et l'utilisation de revêtements de surface (peinture) permettent habituellement de contrôler la vitesse de corrosion uniforme.

3.2.2 Corrosion galvanique

Reactions

At the Anode:



At the Cathode:



In the Electrolyte:

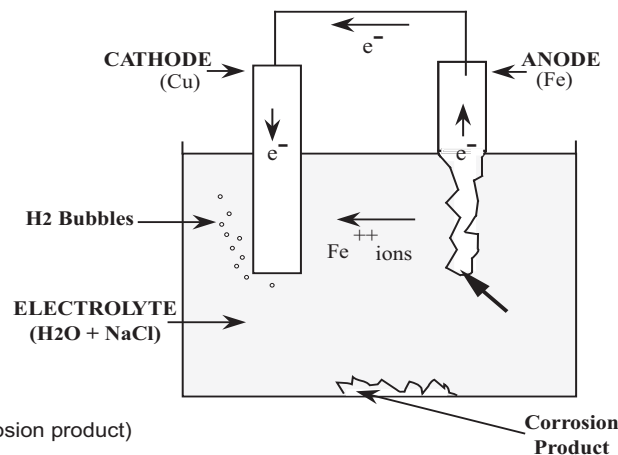
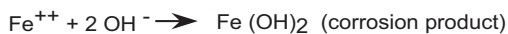


Figure 1A
Cellule électrolytique de type courant

Reactions : Réactions

At the anode : À l'anode

At the cathode : À la cathode

In the electrolyte : Dans l'électrolyte

Corrosion product : Produit de corrosion

CATHODE : CATHODE

ANODE : ANODE

H₂ BUBBLES : BULLES DE H₂

Fe⁺⁺ IONS : IONS FE⁺⁺

ELECTROLYTE : ÉLECTROLYTE

CORROSION PRODUCT : PRODUIT DE CORROSION

Chaque métal ou alliage possède une tendance plus ou moins prononcée à céder ou à partager des électrons. Si deux métaux différents, disons le cuivre et un acier au carbone, sont reliés par un circuit électrique (cellule électrolytique), tel qu'indiqué à la figure 1, l'acier aura tendance à céder des électrons aux ions hydrogène dans la solution aqueuse, ce qui produira de l'hydrogène gazeux (H₂). La solution de sel aqueuse (électrolyte) agit à la fois comme un conducteur d'électricité, et comme un agent réactif.

La cellule électrolytique présentée ici possède deux électrodes; une anode en acier, qui cède des électrons, et une cathode de cuivre, qui les reçoit et les transfère aux ions hydrogène.

La cellule électrolytique peut également être utilisée pour éviter la corrosion. Par exemple, si l'électrode de cuivre dans le schéma ci-dessus est remplacée par du magnésium métal, l'électrode en acier deviendra la cathode à mesure que l'électrode de magnésium (anode) se dissout (se corrode) pour produire des ions magnésium positifs. Le magnésium métal se dissout de manière préférentielle parce que sa tendance à céder des électrons est plus grande que celle de l'acier. Ce phénomène porte le nom de protection cathodique. Lorsque des électrodes composées de deux métaux différents sont reliées, tel qu'indiqué à la figure 1, le métal ayant une tendance plus grande à céder des électrons constituera toujours la cathode. D'autres facteurs ont une incidence sur la vitesse de corrosion galvanique, notamment :

- La concentration d'oxygène dans l'électrolyte (eau industrielle). L'oxygène peut s'approprier des électrons de la cathode, et réagir avec les ions hydrogène dissous pour produire de l'eau.
- L'élévation de température, habituellement, augmente la vitesse des réactions chimiques. La corrosion est une réaction chimique.
- La conductivité de l'eau (électrolyte). Il est évident que la concentration de l'eau doit respecter le principe ALARA (niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre) afin d'accroître la résistance du circuit au transfert d'électrons et, par conséquent, de réduire la vitesse de corrosion.

- Le rapport de la surface active de la cathode à celle de l'anode (rapport de surface active cathode/anode). La vitesse de corrosion augmente à mesure que la surface relative de la cathode augmente, parce que la résistance qui s'oppose au transfert des électrons diminue (l'intensité de courant augmente).

La corrosion galvanique se produit lorsque deux métaux différents sont en contact électrique l'un avec l'autre dans une eau qui peut transférer des électrons, c'est-à-dire qui a une conductivité non nulle.

La corrosion galvanique peut être réduite en choisissant des couples de métaux qui possèdent des tendances semblables à céder des électrons, en isolant les métaux différents l'un de l'autre, et en isolant le métal anodique de l'eau industrielle. Pour ce faire, on peut par exemple isoler les deux métaux différents l'un de l'autre en utilisant un raccord de réduction isolant en plastique dans les raccordements qui relient l'acier et le cuivre. La couche protectrice de magnétite qui se forme sur l'acier dans la plage de pH adéquate tend à isoler le métal anodique de l'électrolyte (eau industrielle).

3.2.3 Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse

La corrosion par piqûres et la corrosion caverneuse sont des cas particuliers de corrosion galvanique dans lesquels la perte de métal est localisée sur une zone de métal relativement petite.

Dans de tels cas, la corrosion se produit à cause des différences de concentration localisées de l'oxygène ou d'un ion agressif, par exemple un ion de chlore, ou encore à cause d'une différence de pH. Cette situation peut survenir lorsque les conditions de l'écoulement provoquent un faible débit ou une stagnation, par exemple, dans les petites fissures, les espaces ou les criques, comme celles associées à la présence de boulons ou de joints d'étanchéité, ou encore aux points de contact entre les métaux.

La corrosion par piqûres est associée au tartre et aux dépôts d'impuretés qui forment une barrière entre l'écoulement principal et l'eau stagnante piégée sous le tartre ou les dépôts d'impuretés. Dans ces conditions, l'oxygène dissous dans l'eau industrielle ne peut pénétrer le tartre. En l'absence relative d'oxygène, le métal sous le dépôt devient anodique, c'est-à-dire qu'il tend à se dissoudre et à former une piqûre profonde. Ce phénomène est illustré à la figure 2.

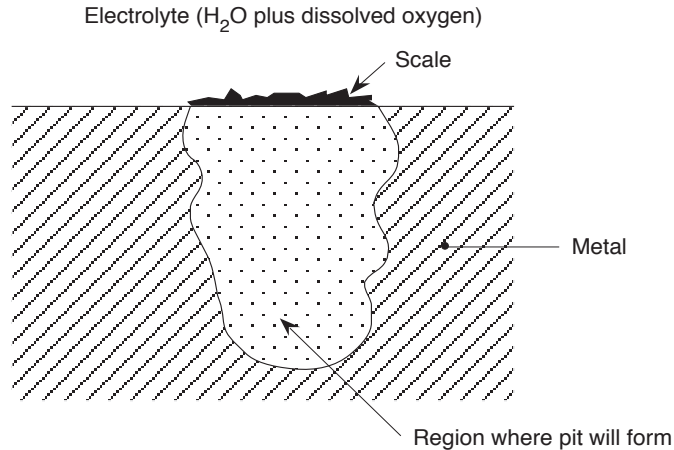


Figure 2
Corrosion par piqûres

Electrolyte (H₂O plus dissolved oxygen) : Électrolyte (H₂O plus oxygène dissous)

Scale : Tartre

Metal : Métal

Region where pit will form : Zone où se forment les piqûres

La corrosion par piqûres et la corrosion caverneuse sont réduites au minimum par un contrôle chimique, un drainage adéquat des cuves durant la mise à l'arrêt, l'enlèvement des solides en suspension par filtration, l'enlèvement des produits de corrosion par échange d'ions et l'enlèvement du tartre, des dépôts d'impuretés et des bactéries.

Le contrôle et l'enlèvement de l'oxygène sont importants, parce que cela tend à réduire le potentiel chimique de formation d'oxygène appauvri, et de zones anodiques.

3.2.4 Fissuration par corrosion sous contrainte (FCC)

La fissuration par corrosion sous contrainte peut se produire là où des contraintes de traction soutenues s'ajoutent à la corrosion et entraînent la formation de fissures localisées. On observe habituellement la FCC dans les systèmes en acier inoxydable, et le phénomène est exacerbé par la présence d'ions chlorure. La FCC peut causer une défaillance soudaine sans phénomène précurseur.

Les contraintes de traction apparaissent durant la fabrication des pièces, suite à une installation inadéquate ou à cause des conditions d'utilisation.

Méthodes visant à contrôler la FCC, tel que discuté au paragraphe 3.4.

3.2.5 Corrosion-érosion

La corrosion-érosion se produit lorsque le débit de l'eau se combine à la corrosion pour augmenter considérablement la vitesse d'enlèvement du métal par rapport à la vitesse d'enlèvement à des débits plus faibles. L'effet du débit est dû à l'enlèvement des ions métalliques et des couches protectrices à mesure qu'ils se forment, ce qui accroît la force d'entraînement de corrosion chimique et peut empêcher la formation d'une couche protectrice. Cet effet est l'une des principales causes de perte de métal dans les tubes des condensateurs de vapeur en alliage de cuivre. Les particules fines et d'autres particules issues des produits de corrosion comme le sable et le limon dans le fluide de refroidissement peuvent également accroître la vitesse de corrosion.

La corrosion-érosion a également pour effet d'amincir les parois des conduites de sortie du circuit caloporteur primaire (CCP). Le contrôle de ce phénomène est examiné dans les paragraphes qui suivent.

Les sillons, ondulations et creux à la surface des métaux, et les courtes périodes de temps qui s'écoulent avant des ruptures imprévues sont caractéristiques du phénomène de corrosion-érosion. La corrosion-érosion est favorisée par les grandes vitesses d'écoulement d'eau, la turbulence, la présence de substances particulières et la chute de gouttes d'eau à grande vitesse sur la surface métallique. Ces effets peuvent être réduits au minimum par une bonne conception.

3.2.6 Corrosion induite microbiologiquement (CIM)

Les bactéries, que l'on trouve couramment dans l'eau stagnante, favorisent la corrosion induite microbiologiquement (CIM). Le phénomène peut se produire avec ou sans oxygène, parce que certaines bactéries ont évolué de manière à se reproduire dans l'une ou l'autre condition. Par exemple, la bactérie *thiobacillus ferrooxidans* peut oxyder le soufre et le transformer en acide sulfurique dans les circuits refroidis à l'eau.

Des nodules de bactéries qui aiment l'oxygène peuvent se déposer à la surface des métaux, ce qui crée des conditions semblables à celles décrites à la section de la corrosion par piqûres.

La chloration et le remplacement des tubes des échangeurs de chaleur sont des moyens permettant de contrôler la corrosion dans les échangeurs de chaleur à l'aide de l'eau de service.

L'élimination des conditions stagnantes est l'un des principaux facteurs de la réduction de la CIM dans certains systèmes comme les travées de combustible irradié, ou les réservoirs de stockage d'eau déminéralisée. Dans les systèmes où l'eau est en recirculation, par exemple dans les échangeurs de chaleur, un pH > 10,5, et l'exclusion de l'air aident à réduire

la croissance bactérienne. Les bactéricides, le traitement chimique et la filtration sont également employés à titre de mesures de contrôle.

3.3 SYSTÈMES EN ACIERS AU CARBONE

Le CCP, les circuits de vapeur et d'eau d'alimentation, les circuits de refroidissement des boucliers d'extrémité et les circuits du condensat sont habituellement considérés comme étant des systèmes en aciers au carbone.

3.3.1 Contrôle du pH dans les systèmes en aciers au carbone

Comme nous l'avons mentionné dans la section précédente, le pH est généralement maintenu à une valeur supérieure à 10 et inférieure à 12 afin de réduire au minimum la vitesse de corrosion des aciers au carbone. La plage de pH dans le CCP se situe entre 10,1 et 10,4. Le pH du côté secondaire se situe généralement entre 9 et 9,8 dans l'eau d'alimentation du condensat (celui de Pickering est plus bas). La valeur du pH peut s'approcher de 12 dans les conditions de température propres aux générateurs de vapeur.

Une plage de pH relativement étroite est nécessaire pour réduire au minimum la vitesse de dissolution de la couche protectrice de magnétite, dans le but d'éviter l'attaque acide de l'acier dans des conditions de faible pH et de réduire la vitesse de conversion de la magnétite en rouille poreuse par l'oxygène dissous à un pH élevé.

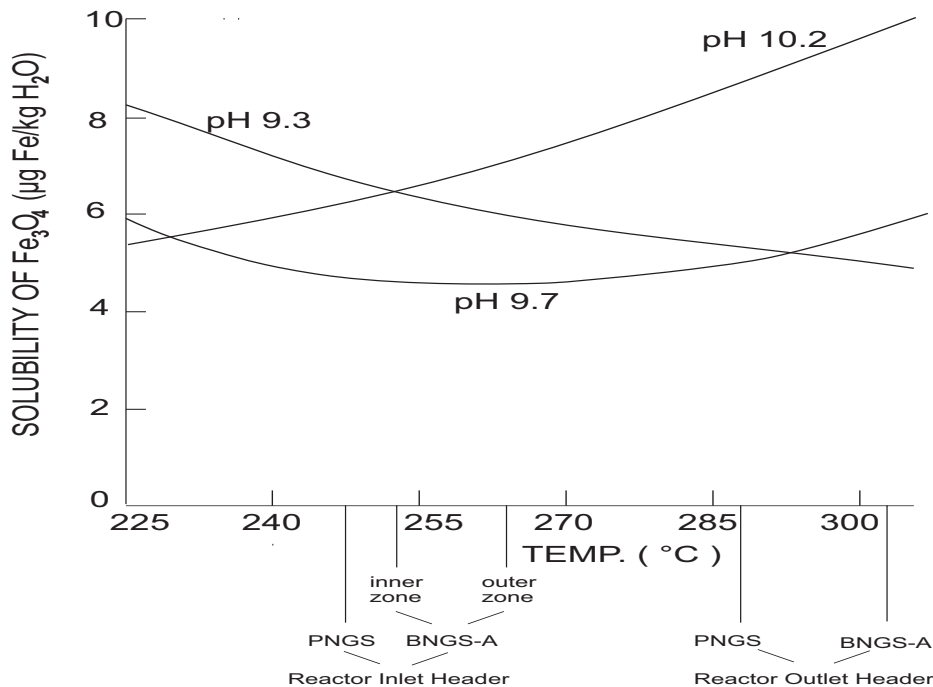


Figure 3

Solubilité de la magnétite en fonction de la température pour différents pH

1. SOLUBILITÉ DU Fe_3O_4 ($\mu\text{g Fe/kg H}_2\text{O}$)
2. Zone interne
3. Zone externe
4. Centrale nucléaire de Pickering
5. Centrale nucléaire de Bruce-A
6. Collecteur d'eau froide du réacteur
7. Centrale nucléaire de Pickering
8. Centrale nucléaire de Bruce-A
9. Collecteur de sortie du réacteur
10. TEMPÉRATURE

Circuit caloporteur primaire (CCP)

À un pH élevé, disons 10,2 tel qu'illustré à la figure 3, la solubilité de la magnétite est plutôt élevée et diminue avec la température. Par conséquent, la magnétite a tendance à se dissoudre près du collecteur de sortie du réacteur, où la température est la plus élevée, et elle se dépose sur les composantes plus froides du CCP, ce qui met en péril la couche protectrice d'oxyde de zirconium. La corrosion des tubes de force sous les tampons d'appui du combustible sera également favorisée. Les dommages causés à la couche d'oxyde de zirconium peuvent donner lieu à une hydruration accrue des tubes de force. Le deutéroxyde de lithium peut se concentrer aux tampons d'appui du combustible et attaquer l'alliage de zirconium par le mécanisme de corrosion caverneuse. L'amincissement de la paroi des conduites de sortie dû à la corrosion-érosion est également une préoccupation lorsque le pH est hors intervalle du côté plus élevé.

On observe fréquemment un pH élevé au démarrage dans les tranches où il y a des impuretés cachées (en l'occurrence du deutéroxyde de lithium). Lors du refroidissement ou lors d'une baisse de puissance du réacteur, le CCP se rétracte, tirant l'eau lourde et le deutéroxyde de lithium concentré du pressuriseur vers le CCP, ce qui cause une excursion du pH dans le CCP.

Il suffit d'installer dans les conduites une colonne IX deutérée permettant de remplacer le lithium en excès par des ions de deutérium pour assurer le contrôle du pH élevé.

Pour un faible pH, disons 9,3 tel qu'indiqué à la figure 3, la magnétite est moins soluble aux températures plus élevées, et se déposera sur les surfaces plus chaudes à l'intérieur du cœur, ce qui causera une réduction du transfert thermique, des points chauds sur la gaine du combustible et une

défaillance du combustible (l'augmentation de la corrosion de l'acier au carbone entraînera également la présence de quantités plus grandes de produits de corrosion activés dans le coeur, et de champs plus élevés hors du coeur).

Une ou plusieurs des situations suivantes sont à l'origine d'un faible pH :

- Colonnes IX usées.
- Présence de lithium sous forme de carbonate plutôt que de deutéroxyde. Le carbonate est une base beaucoup plus faible que le deutéroxyde : le carbonate peut être contenu dans une résine, ou provenir de la radiolyse de la matière organique, ou encore de l'air si le CCP est ouvert durant la mise à l'arrêt.
- Le deutéroxyde de lithium se trouve dans les vannes du pressuriseur. La vapeur s'échappe du pressuriseur vers le condenseur de purge et est remplacée par l'eau du CCP, qui contient du deutéroxyde de lithium. À mesure que la vapeur s'échappe, la concentration du deutéroxyde non volatil augmente dans le pressuriseur. Une baisse correspondante du pH dans le circuit se produira, ce qui nécessitera l'addition de deutéroxyde de lithium. (À noter qu'il n'y a pas de pressuriseur à Pickering.)

Le faible pH est contrôlé par l'addition d'hydroxyde de lithium ou par l'installation, dans les conduites, de colonnes IX neuves au besoin.

Circuit du condensat, de l'eau d'alimentation et du générateur de vapeur (Circuit CEAGV)

Les centrales CANDU en Ontario utilisent des bases volatiles (morpholine ou hydroxyde d'ammonium, habituellement par addition d'hydrazine) pour le contrôle du pH, dans le but de réduire au minimum la corrosion dans les systèmes ferreux. Dans le cas du traitement aux substances volatiles, la volatilité est importante parce que toute l'eau qui circule par cycle dans le générateur de vapeur est vaporisée. Si les produits chimiques ajoutés ne sont pas évaporés avec l'eau, ils auront tendance à se concentrer dans des boues qui se déposeront dans le générateur de vapeur, ce qui crée des conditions de corrosion.

Des produits chimiques visant à contrôler le pH et à réduire au minimum la corrosion sont ajoutés en aval de la pompe d'extraction des condensats (PEC).

Les tubes du condenseur et du réchauffeur d'eau d'alimentation des circuits CEAGV dans toutes les nouvelles centrales CANDU sont en acier inoxydable, et les conduites ainsi que la plupart des autres composantes

sont en aciers au carbone. Ainsi, les circuits CEAGV sont essentiellement tous ferreux.

Dans les centrales à circuits ferreux, les mesures en continu du pH sont faites en amont des réchauffeurs d'eau d'alimentation basse pression, afin d'assurer le contrôle du pH du condensat et de le maintenir entre 9,8 et 10,0. L'hydroxyde d'ammonium permet de contrôler le pH dans la plupart des centrales à circuits ferreux. L'hydroxyde d'ammonium se forme suite à la décomposition de l'hydrazine en excès, ou il peut être ajouté directement. La morpholine est également spécifiquement utilisée dans les centrales à circuit non ferreux parce qu'elle réduit le transport des produits de corrosion dans l'eau d'alimentation, et réduit également la corrosion-érosion dans les zones à deux phases (vapeur humide). Lorsque le pH du condensat souhaité est obtenu, le pH de l'eau du générateur de vapeur passera à la valeur souhaitée de $> 9,5$.

Circuits auxiliaires

Les circuits auxiliaires, bien qu'ils ne soient pas couverts par les objectifs ou les énoncés KL du module, nécessitent également un contrôle du pH.

Les circuits auxiliaires comprennent le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité, le système de contrôle de la zone liquide, le circuit d'eau de refroidissement en recirculation et les travées de stockage du combustible irradié. Le contrôle est affecté par l'échange d'ions, tel qu'indiqué au tableau 1 :

Circuit	Résines en lits mixtes	But
Refroidissement des boucliers d'extrémité	Li^+ , OH^-	Éliminer les impuretés non souhaitables (ions) et maintenir le pH du circuit (habituellement entre 10,0 et 10,5)
Contrôle de la zone liquide	H^+ , OH^-	Éliminer les impuretés non souhaitables (ions) et maintenir le pH du circuit (conductivité habituellement $< 0,1$ mS/m, pH de 6,0 à 8,0)
Eau de refroidissement en recirculation	Li^+ , OH^-	Éliminer les impuretés non souhaitables (ions) et maintenir le pH du circuit (habituellement entre 9,0 et 10,8)
Travées de stockage du combustible irradié	H^+ , OH^-	Éliminer les impuretés non souhaitables (ions) et maintenir le pH du circuit (habituellement entre 6,5 et 7,5, conductivité $< 0,2$ mS/m)
Eau de refroidissement du stator	H^+ , OH^- et colonne de désoxygénation	Éliminer l'oxygène dissous par une colonne de désoxygénation et d'autres impuretés non souhaitables (ions) dans une colonne à lit mixte et maintenir le pH du circuit (habituellement entre 6 et 8, la conductivité $< 0,1$ mS/m, et l'oxygène dissous < 20 ppb)

Tableau 1
Contrôle du pH dans les circuits auxiliaires par échange d'ions

3.3.2 Importance du contrôle de l'oxygène dissous et méthodes de contrôle courantes

Circuit caloporteur primaire (CCP)

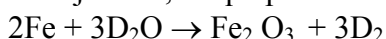
L'oxygène élémentaire gazeux est produit dans le circuit caloporteur primaire (CCP) par la radiolyse de l'eau lourde (D₂O). Le fait de maintenir une faible concentration d'oxygène dissous réduit au minimum la corrosion des aciers au carbone et du zirconium.

Une faible concentration d'oxygène gazeux est également importante parce que :

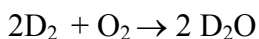
- L'oxygène peut causer une fissuration par corrosion sous contrainte des tubes des générateurs de vapeur en inconel et entraîner la corrosion du monel-400.
- L'oxygène gazeux augmente l'agressivité des ions chlorure.

Ces questions sont examinées ci-après.

L'oxygène corrode le zirconium et l'acier au carbone et peut convertir l'oxyde protecteur (oxyde de zirconium et magnétite) en couches d'oxyde hydraté poreuses. Cette porosité permet à l'eau d'attaquer les métaux sous-jacents, ce qui produit des oxydes et du deutérium :



Le maintien du deutérium dissous à l'intérieur des spécifications (3 à 10 cc/kg de D₂O) permet de contrôler l'oxygène dissous dans le CCP. Le léger excès de deutérium dissous (ou d'hydrogène) consomme l'oxygène dissous par la réaction suivante :



Circuit du condensat, de l'eau d'alimentation et du générateur de vapeur

Par souci de clarté, on peut dire que l'expression circuit CEAGV (circuit du condensat, de l'eau d'alimentation et du générateur de vapeur) correspond au côté secondaire (eau ordinaire). L'unité de travail globale comprend le générateur de vapeur, la turbine, le condenseur, la pompe d'extraction du condensat, le réchauffeur d'eau d'alimentation basse pression, le dégazeur, la pompe d'alimentation des générateurs de vapeur et les réchauffeurs d'eau d'alimentation basse pression. L'objectif principal du contrôle chimique consiste à réduire au minimum la corrosion et ses conséquences, particulièrement la formation de boues et de tartre.

L'oxygène gazeux dissous est l'impureté la plus néfaste pour le circuit du condenseur, de l'eau d'alimentation et du générateur de vapeur parce que,

comme nous l'avons mentionné précédemment, il convertit la magnétite protectrice en rouille poreuse et favorise la corrosion dans le circuit. Les produits de corrosion causent la présence de boues et de dépôts d'impuretés. Ces effets néfastes augmentent à mesure que la concentration en oxygène gazeux augmente.

L'oxygène dissous augmente l'agressivité des ions chlorure, particulièrement dans des conditions anodiques localisées qui favorisent la corrosion par piqûres.

En raison de ses mécanismes chimiques de corrosion, la présence d'oxygène dissous dans le circuit d'eau d'alimentation doit être éliminée le plus possible afin de réduire au minimum la présence de produits de corrosion et leur transport vers les générateurs de vapeur, et de réduire au minimum la corrosion, particulièrement la corrosion par piqûres des tubes des générateurs de vapeur en présence de chlorure.

Pour maintenir l'oxygène dissous au niveau ALARA (niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre), on doit s'assurer de contrôler l'oxygène dissous par les trois étapes suivantes :

La première étape concerne le circuit d'extraction de l'air du condenseur. La majeure partie de l'extraction de l'oxygène dissous ou de l'air s'effectue en amont des conduites d'eau du condenseur. Les sources en aval des conduites d'eau sont les principaux éléments qui agissent sur la teneur en oxygène dissous du condensat.

À la deuxième étape, l'oxygène dissous se retire du condensat par le dégazeur, qui contient des pulvérisateurs, des barboteurs de vapeur et des cellules en cascade sur lesquelles l'eau chaude culbute. La combinaison de la chaleur et d'une zone à grande surface assure une extraction efficace des gaz dissous. L'oxygène est réduit à < 5 ppb (masse/masse) et les gaz non condensables sont également éliminés. Le dégazage efficace réduit la consommation de produits chimiques à l'étape finale.

À l'étape finale de l'élimination de l'oxygène, on ajoute de l'hydrazine qui réagit chimiquement avec le reste de l'oxygène dissous pour produire de l'azote gazeux et de l'eau.

Un excès d'hydrazine est requis pour contrôler l'oxygène dissous de manière à le maintenir sous la barre des 5 ppb. Les quantités en excès causeront une élévation du pH, à mesure que l'hydrazine les convertit lentement en hydroxyde d'ammonium, une base faible. Ce composé doit être contrôlé pour protéger les circuits de laiton ferreux qui contiennent du

cuivre, qui se dissout dans l'hydroxyde d'ammonium. (Dans tous les circuits ferreux, la préoccupation principale est un rejet dans l'environnement par l'eau de purge.)

3.4 IMPORTANCE DU CONTRÔLE DE LA CONDUCTIVITÉ ET MÉTHODES DE CONTRÔLE COURANTES

Circuit caloporteur primaire (CCP)

La conductivité et le lithium ne sont pas spécifiquement contrôlés dans le CCP, mais ce sont des paramètres de diagnostic importants. On les utilise pour le dépannage à tous les niveaux d'action, dans les cas où le pH du CCP dépasse les niveaux prévus. Si la quantité de lithium présent est de beaucoup supérieure à celle indiquée par le pH du circuit, on peut avoir recours à des mesures de la conductivité d'échantillons ponctuels pour aider à expliquer cet écart. La conductivité indique généralement la présence d'autres ions (comme les ions carbonate). Les corrélations entre la conductivité et les concentrations des espèces ioniques sont possibles parce que les conductivités spécifiques des espèces ioniques individuelles sont connues.

Circuits du condensat, de l'eau d'alimentation et du générateur de vapeur

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'expression circuit CEAGV (circuit du condensat, de l'eau d'alimentation et du générateur de vapeur) correspond au côté secondaire (eau ordinaire). L'unité de travail globale comprend le générateur de vapeur, la turbine, le condenseur, la pompe d'extraction des condensats, le réchauffeur d'eau d'alimentation basse pression, le dégazeur, les pompes d'alimentation des générateurs de vapeur et les réchauffeurs d'eau d'alimentation haute pression. L'objectif principal du contrôle chimique est de réduire au minimum la corrosion et ses conséquences, particulièrement la formation de boues et de tartre. Ce problème est examiné à la section suivante.

La conductivité des cations de l'eau des générateurs de vapeur est un paramètre de fonctionnement ayant une limite en cas de mise à l'arrêt. Les impuretés peuvent être soit des anions inorganiques agressifs comme les sulfates et les chlorures, ou encore de simples anions organiques issus des éléments d'addition ou de l'usine de traitement d'eau. Comme les anions organiques sont moins corrosifs, la contribution inorganique doit être déterminée avant la mise à l'arrêt. Le fait de maintenir la contribution inorganique dans la conductivité des cations au niveau ALARA protège les tubes de générateurs de vapeur contre la corrosion.

L'eau des générateurs de vapeur a une conductivité élevée à cause de la présence de certaines substances ajoutées dans le but d'ajuster le pH (morpholine, hydrazine et hydroxyde d'ammonium), des traces de sels dans l'eau brute de refroidissement et des produits de corrosion dissous. À cause de l'effet masquant de la conductivité, la conductivité (spécifique) ordinaire n'est pas assez sensible pour être utilisée comme paramètre de contrôle. La conductivité des cations est utilisée parce qu'elle est plus sensible à la présence d'anions néfastes, comme le chlorure, le sulfate et la silice.

Les causes possibles de la conductivité élevée des cations comprennent l'excursion acide de l'usine de traitement, ce qui permet aux ions sulfate de s'immiscer dans l'eau d'appoint. Ou encore, il pourrait s'agir d'une fuite dans un ou plusieurs tubes de condenseur qui laisserait entrer l'eau brute dans le circuit CEAGV.

La conductivité des cations est réduite ou contrôlée par des purges des générateurs de vapeur, et par la réparation des fuites, au besoin. Si la conductivité n'est pas contrôlée, on risque d'observer les conséquences suivantes :

- Formation de tartre dans les tubes des générateurs de vapeur;
- Corrosion et défaillance des tubes des générateurs de vapeur;
- Perte de la couche de protection en magnétite sur les surfaces en aciers au carbone favorise l'apparition de corrosion générale (excursion acide seulement).

Pour déterminer la conductivité des cations, on passe un échantillon d'eau des générateurs de vapeur dans une colonne échangeuse de cations. La colonne remplace tous les cations (incluant ceux de la morpholine, de l'hydroxyde d'ammonium et de l'hydrazine) par des ions hydrogène. L'eau qui sort de la colonne d'échange de cations contiendra des ions hydrogène et divers anions. Pour cette raison, le signal de conductivité sera plus grand car les anions sont davantage susceptibles d'être entièrement ionisés, c'est-à-dire d'avoir leur charge négative maximale. La conductivité de l'eau traitée de cette manière est appelée conductivité des cations. La conductivité des cations souhaitable pour l'eau des générateurs de vapeur est celle du principe ALARA. La spécification est $< 0,25$ m/S/m pour la plupart des centrales.

L'utilisation d'une eau d'appoint à très faible conductivité, provenant de l'usine de traitement, est un facteur important pour le maintien de la conductivité de l'eau des générateurs de vapeur ALARA. Des purges continues permettent de contrôler la conductivité de l'eau des générateurs de vapeur en éliminant constamment les impuretés du système. La

conductivité des cations de l'eau des générateurs est surveillée par des analyses continues, avec une vérification d'échantillons ponctuels.

3.5 SYSTÈMES EN ACIER INOXYDABLE

Les systèmes qui entrent dans la catégorie des systèmes en acier inoxydable sont le circuit du modérateur, le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité et le système de contrôle de la zone liquide (SCZL).

Le phénomène de fissuration par corrosion sous contrainte est défini à la section 3.2.3.

3.5.1 FCC dans le modérateur

La corrosion sous contrainte favorisée par les chlorures peut se produire dans le calandre et dans d'autres pièces en acier inoxydable du circuit du modérateur. Bien qu'une teneur élevée en chlorures ne soit pas un problème courant, la source de chlorures la plus probable est la résine usée présente dans la colonne échangeuse d'ions. Les chlorures sont éliminés par un contrôle d'échange d'ions adéquat.

3.5.2 FCC dans le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité et le système de contrôle de la zone liquide

Les matières qui composent le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité sont les suivantes :

Pompes-acier inoxydable;

- Vase d'extension-acier au carbone;
- Filtre-acier inoxydable;
- Colonne échangeuse d'ions-acier inoxydable;
- Crépine-acier au carbone;
- Vannes-la majorité sont en acier au carbone, avec des vannes de détente en acier inoxydable;
- Conduites-acier au carbone;
- Échangeur thermique-laiton amirauté, plaques en titane Darlington.

Ce circuit possède une spécification de pH de 10 à 10,5 avec une valeur souhaitable de 10,2. Le pH est gardé constant par la circulation dans des résines échangeuses d'ions lithiées dans toutes les centrales. L'autre paramètre de contrôle pour ce système est de 0,2 mg/kg. L'hydrazine ne peut pas être utilisée dans ce système pour contrôler l'oxygène dissous parce qu'elle risque de favoriser la production d'hydrogène, ce qui pourrait donner lieu à une excursion d'hydrogène gazeux.

La chimie du circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité et du système de la zone liquide est essentiellement la même que celle du modérateur, sauf que c'est de l'eau ordinaire qui est utilisée pour contrôler le flux de neutrons et la réactivité.

Des concentrations élevées d'ions chlorure peuvent favoriser la fissuration par corrosion sous contrainte. Comme nous l'avons déjà mentionné, la source de chlorure est une colonne IX usée qui laisse se détacher des particules dans l'eau. Le fait de remplacer la colonne usée permet de la contrôler. L'oxygène est également associé à la FCC, ce qui favorise l'effet de l'ion chlorure.

3.5.3 Contrôle du pH dans les circuits en aciers inoxydables et méthodes de contrôle courantes

Contrôle du pH du modérateur

Le pH du modérateur est contrôlé seulement en même temps que la conductivité à l'aide de colonnes échangeuses d'ions dans le but d'éliminer les ions qui constituent des impuretés, et de les remplacer par des ions deutéroxyde ou des ions de deutérium, c'est-à-dire par de l'eau lourde. Lorsque la conductivité du modérateur est maintenue à sa limite la plus faible sur le plan pratique, l'eau lourde est presque pure, et s'ionise très légèrement. À mesure que le pH du modérateur s'éloigne de la valeur neutre d'un côté ou de l'autre, la conductivité augmente. Le pH est analysé pendant le fonctionnement seulement pour mettre au point la conductivité élevée.

Une exception survient lorsque le nitrate de gadolinium est présent en quantités relativement élevées dans l'eau lourde du modérateur. Dans un tel cas, comme le deutéroxyde de gadolinium peut précipiter si le pH est trop élevé, la spécification du pH est entre 4 et 6. (Le pH devient un paramètre de contrôle durant l'état d'arrêt garanti de surempoisonnement.)

Dans des cas spéciaux (durant le démarrage d'une tranche), lorsque le nitrate de gadolinium est présent, le pH du modérateur peut passer à 7 et à une valeur plus élevée. Cela se produit lorsque la résine échangeuse de cations dans la colonne IX à lit mixte est usée avant la colonne échangeuse d'anions, ce qui libère des ions deutéroxyde en excès. Le résultat est une augmentation du pH au-dessus de 6.

Un pH élevé localisé peut également être observé dans une colonne échangeuse d'ions où, après que la résine a été réduite en boue, la stratification des grains de résine commence à se faire, ce qui donne lieu à une proportion élevée de résine échangeuse d'anions dans une zone localisée, au-dessus de la résine échangeuse de cations. L'élution des ions deutéroxyde en provenance de la résine échangeuse d'anions augmentera le

pH de la solution et causera la précipitation du deutéroxyde de gadolinium dans la colonne. Pour s'assurer qu'une quantité suffisante de résine échangeuse de cations est présente en vue d'éliminer le gadolinium et d'éviter la précipitation du deutéroxyde de gadolinium dans la colonne, on ajoute un surplus de résine échangeuse de cations au lit mixte afin de réduire au minimum la possibilité de séparation et de s'assurer que le lit ne perd pas de cations (le gadolinium est présent sous forme de cations).

Les causes possibles d'un pH élevé dans le modérateur sont les suivantes :

- L'utilisation inadéquate de la résine du circuit caloporteur (à base de lithium) dans une colonne IX.
- Une trop grande quantité de résine échangeuse d'anions par rapport à la quantité de résine échangeuse de cations dans les colonnes IX, qui enlève les ions gadolinium mais pas les ions nitrate.
- La contamination du modérateur par des sources alcalines comme l'eau lourde du circuit caloporteur ou l'hydroxyde de lithium.

Le pH élevé du modérateur est contrôlé par l'utilisation adéquate du système d'échange d'ions.

Un faible pH dans le modérateur est probablement dû à des fuites d'air dans le gaz de couverture. L'azote dans l'air est converti par radiolyse en acide nitrique, qui abaisse le pH du modérateur.

Un faible pH accélère la corrosion des échangeurs thermiques et augmente les concentrations de deutérium gazeux et d'oxygène dans le gaz de couverture.

Le contrôle d'un faible pH est assuré par les mesures suivantes :

- Réduire au minimum les entrées d'air;
- Purger le gaz de couverture lorsque la concentration d'azote est trop élevée, après que le système a été ouvert pour l'entretien;
- S'assurer que les colonnes IX fonctionnent correctement.

Contrôle du pH dans le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité et dans le système de contrôle de zone liquide

La chimie du SCZL, incluant le gaz de couverture et le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité, est la même que celle du circuit du modérateur, sauf que le gadolinium n'est pas utilisé. Cependant, la conductivité est le seul paramètre utilisé pour contrôler la pureté de l'eau dans le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité et le circuit CZL.

Les impuretés, particulièrement les ions chlorure, favorisent le rejet d'hydrogène radiolytique et d'oxygène gazeux qui, avec l'azote et l'argon, sont surveillés dans le gaz de couverture. Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'azote est converti radiolytiquement en acide nitrique et l'argon peut être activé en argon 41, ce qui accroît les champs dans les zones des conduites. Les contaminants précités, qui sont contenus dans le gaz de couverture, sont maintenus au niveau ALARA.

3.5.4 Contrôle de la conductivité dans les systèmes en acier inoxydable et méthodes de contrôle courantes

Contrôle de la conductivité dans le modérateur

La corrosion peut affecter la calandre, les mécanismes de réactivité, les tubes des zones liquides, les circuits de nettoyage, les échangeurs thermiques et d'autres surfaces métalliques exposées au modérateur.

La conductivité du modérateur est maintenue au niveau ALARA pour s'assurer que l'eau du modérateur est la plus pure possible. Comme nous l'avons mentionné plus tôt, la conductivité du modérateur est le seul paramètre de contrôle du modérateur. Une conductivité élevée dans le modérateur augmente le taux de radiolyse, ou bris des molécules d'eau en O_2 et D_2 par le rayonnement gamma. Une concentration élevée de D_2 dans le gaz de couverture risque de former des mélanges de gaz explosifs dans le gaz de couverture. Lorsque le bore est présent comme poison, il n'a que peu d'effets sur la conductivité ou sur les produits de radiolyse.

Le nitrate de gadolinium, par ailleurs, accroît la formation de deutérium radiolytique gazeux et influe sur la conductivité.

Les causes possibles de la conductivité élevée du modérateur sont les suivantes :

- Entrées d'air qui produisent de l'acide nitrique par radiolyse;
- Colonnes IX usées, qui permettent aux impuretés de passer dans l'effluent de la colonne;
- Ajouts de nitrate de gadolinium pour le contrôle de la réactivité;
- Présence d'autres impuretés issues des produits de corrosion dissous.

La conductivité élevée du modérateur est contrôlée par les mesures suivantes :

- Éviter l'entrée d'air et l'admission de contaminants;
- Purger l'azote du gaz de couverture, lorsqu'il est présent en trop grandes quantités, après avoir ouvert le circuit;

- S'assurer que les colonnes IX ne sont pas usées.

Bien que le contrôle de la conductivité ALARA aide à réduire la vitesse de corrosion, son objectif le plus important consiste à réduire la possibilité d'une excursion du gaz de couverture (deutérium), qui peut se produire très rapidement, en quelques minutes.

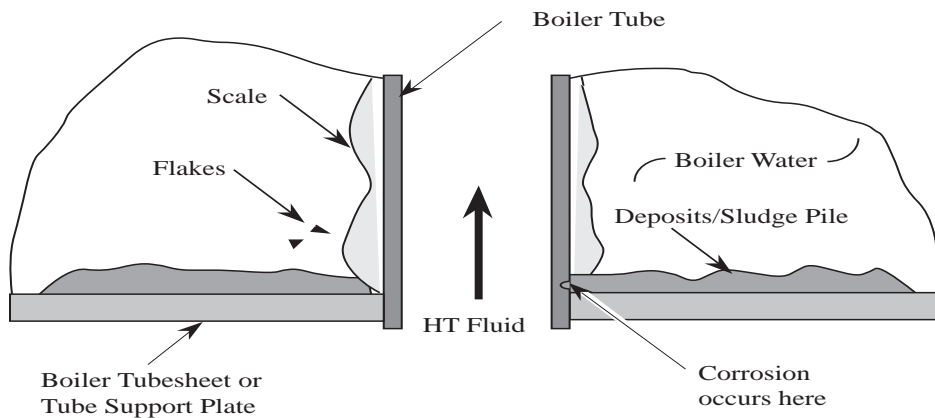


Figure 4
Tartre dans les tubes des générateurs de vapeur et dépôts dans les plaques tubulaires

1. Boiler Tube : Tube du générateur de vapeur
2. Scale : Tartre
3. Flakes : Écailles
4. Boiler Water : Eau du générateur de vapeur
5. Deposits/Sludge Pile : Dépôts/empilement de boues
6. HT Fluid : Fluide caloporteur
7. Boiler Tubesheet or Tube Support Plate : Plaques tubulaires du générateur de vapeur ou plaques entretoises
8. Corrosion occurs here : Site de corrosion

3.6 FORMATION DE TARTRE

3.6.1 Mécanismes de formation et conséquences néfastes de la formation de tartre sur les tubes des générateurs de vapeur – Méthodes visant à réduire le tartre au minimum

Au fil du temps, la concentration des impuretés, à l'exception de certains produits chimiques servant au traitement de l'eau, aura tendance à augmenter dans l'eau des générateurs de vapeur, à moins qu'elle ne soit

contrôlée. Même avec un contrôle IX, où l'écoulement est faible ou restreint, les impuretés localisées, par exemple dans des fissures, peuvent atteindre des concentrations élevées. La formation de boues et de sites de tartre en résultent. Ces impuretés piégées sont appelées impuretés cachées car elles ne sont pas mesurées durant l'échantillonnage.

La figure 4 montre du tartre dans un générateur de vapeur, qui est une couche de matières étrangères qui se sont accumulées à la surface des tubes des générateurs de vapeur. Les matières particulières en suspension sont formées à partir des produits de corrosion et ont tendance à se fixer dans des zones où l'écoulement est faible, en formant des dépôts de boues. Des écailles de tartre peuvent également se détacher des tubes et contribuer à la formation de boues.

En résumé, les substances qui forment des boues et du tartre sont les suivantes :

- Matières inorganiques solides en suspension (particules);
- Matières inorganiques dissoutes;
- Matières organiques dissoutes et en suspension.

Si l'usine de traitement d'eau ne fonctionne pas bien, cela peut également contribuer à des concentrations élevées d'impuretés ioniques comme les chlorures, les sulfates, le calcium et le magnésium dans le générateur de vapeur.

Les produits de corrosion, habituellement du fer et des oxydes de cuivre, se forment dans l'ensemble du circuit de vapeur et d'eau d'alimentation du générateur de vapeur; ce sont les principales sources de matières particulières inorganiques en suspension. Les petites quantités entrent dans le circuit par l'eau d'appoint, bien que celle-ci soit habituellement très pure. L'autre source est l'eau brute qui entre par des tubes du condenseur qui sont perforés, ce qui contribue principalement à la présence de silicate de calcium et de silicate de magnésium.

Certaines matières organiques peuvent résulter du bris des produits chimiques servant au traitement de l'eau, de fuites d'huile lubrifiante, de l'entrée d'eau brute par des tubes de condenseurs défectueux, de la croissance bactérienne dans le circuit d'eau déminéralisée et de fines particules de résines provenant des systèmes IX.

En bref, les dépôts de tartre et de boues sur les tubes sont causés par la présence de sels inorganiques, de petites quantités de matières organiques et de produits de corrosion dans l'eau d'alimentation.

3.6.2 Effets néfastes des dépôts de boues et de la formation de tartre

Si des boues et des dépôts de boues et de tartre se forment dans des parties sensibles du circuit du générateur de vapeur, de graves problèmes de corrosion risquent de survenir sous les dépôts. La concentration des impuretés dans les zones d'écoulement du générateur de vapeur peut augmenter de 10 000 à 100 000 fois dans la phase gazeuse de l'écoulement à cause de l'effet de concentration de l'ébullition dans les parties sensibles du générateur de vapeur.

La corrosion par piqûres sous des dépôts de boues peut résulter en partie des concentrations élevées de chlorures ou de sulfates à la base des tubes du générateur de vapeur. L'hydroxyde de sodium peut causer une attaque caustique semblable des tubes du générateur de vapeur.

Les particules entraînées dans l'eau en mouvement peuvent contribuer à la corrosion-érosion et peuvent former un dépôt de boues qui est extrêmement difficile à enlever.

Tout processus de corrosion peut raccourcir la durée de vie des tubes du générateur de vapeur, ce qui contribue à la possibilité de fuite d'eau lourde ou de tritium dans le circuit du générateur de vapeur.

Les dépôts de tartre sur les tubes du générateur de vapeur peuvent également contribuer à la corrosion et, en outre, réduire l'efficacité du transfert de chaleur, élevant la température dans le circuit caloporteur (eau lourde) ou réduire le coefficient de transfert de chaleur.

Des dépôts importants sur les plaques entretoises peuvent causer des problèmes de contrôle de niveau en restreignant l'écoulement de l'eau et de la vapeur dans le générateur de vapeur.

En résumé, les effets néfastes des impuretés sur la performance du générateur de vapeur et les matériaux comprennent notamment :

- L'accumulation d'impuretés solides sous forme de boues crée un milieu corrosif très défavorable.
- La corrosion par piqûres et/ou les attaques caustiques surviennent sous les dépôts de boues.
- La corrosion-érosion peut être causée par des particules en suspension dans l'écoulement.
- Des dépôts de tartre et de boues sur les plaques entretoises peuvent causer des problèmes de contrôle de niveau en restreignant l'écoulement d'eau et de vapeur.

- Au fil du temps, les boues peuvent devenir extrêmement difficiles à enlever.
- La durée de vie des tubes sera plus courte et la durée des arrêts plus long s'il y a perforation des tubes à cause de la corrosion.
- Des pertes de temps de production et des pannes se produiront à cause des fuites des tubes du générateur de vapeur et du temps pris pour enlever les dépôts.
- Le tartre causera une résistance accrue au transfert de chaleur, ce qui augmentera les températures du circuit caloporteur ou une réduction du transfert de chaleur.

QUESTIONS DE RÉVISION

CORROSION

1. Décrire chacun des types de corrosion suivants :
 - Corrosion uniforme
 - Corrosion galvanique
 - Corrosion par piqûres
 - Fissuration par corrosion sous contrainte
 - Corrosion-érosion
 - Corrosion induite microbiologiquement
2. Préciser la plage de pH courante qui est considérée comme étant optimale pour les circuits en aciers au carbone. Expliquer les conséquences sur le fonctionnement lorsque le pH est en dehors de cette plage.
3. Décrire les méthodes de contrôle du pH dans le circuit caloporteur.
4. Expliquer les conséquences des niveaux de O₂ élevés dans les systèmes d'eau.
5. Préciser quelle est la méthode employée pour contrôler les niveaux de O₂ dans le circuit caloporteur.
6. Mentionner trois méthodes utilisées pour contrôler le niveau de O₂ dans le condensat et les circuits d'eau d'alimentation.
7. Décrire les conséquences négatives d'une conductivité élevée dans le circuit du modérateur.
8. Décrire quatre sources potentielles de conductivité élevée dans le circuit du modérateur.
9. Décrire trois méthodes visant à maintenir une faible conductivité dans le circuit du modérateur.
10. Définir les termes boues et tartre et mentionner trois substances qui contribuent à leur formation.
11. Mentionner et expliquer quatre conséquences néfastes de la formation de boues et de tartre en excès dans un générateur de vapeur.

4.0 TUBES DE FORCE ET GRAPPES DE COMBUSTIBLE

4.1 INTRODUCTION

Les matériaux qui constituent les réacteurs nucléaires sont exposés aux rayonnements ionisants, par exemple, les rayons gamma, bêta, et alpha, ainsi qu'aux neutrons rapides et aux neutrons thermiques. Ces formes de rayonnement sont hautement énergétiques, et causent des dommages en interagissant avec le noyau ou les électrons atomiques des atomes qui constituent les matériaux de tous genres.

Les changements observés dans la structure atomique des éléments peuvent causer des changements fondamentaux dans les propriétés mécaniques des matériaux. En particulier, les rayons gamma, contrairement aux rayonnements alpha et bêta, ont une très grande capacité à endommager de façon permanente les matériaux.

Les neutrons rapides peuvent causer des dommages structuraux en déplaçant des atomes, ce qui laisse des espaces vacants et entraîne la présence d'atomes interstitiels dans la structure cristalline des matériaux. Ce phénomène explique les plus grandes vitesses de fluage dans les tubes de force.

Les neutrons thermiques peuvent être capturés par les noyaux, ce qui change la nature du matériau. Par exemple, le cobalt 59 se transformera en cobalt 60 radioactif. Ce phénomène est l'une des principales raisons pour lesquelles on doit maintenir la concentration de métaux dissous au niveau le plus faible possible.

Les neutrons thermiques forment également des gaz, comme le krypton, le xénon et l'iode, qui peuvent migrer pour former des bulles de gaz pouvant causer la fragilisation et la présence de boursouffures dans la gaine du combustible, ce qui augmente le risque de ruptures.

4.2 EFFETS DU RAYONNEMENT SUR LES MATÉRIAUX COURANTS

4.2.1 Huiles et graisses

Les huiles et les graisses sont deux substances affectées par les rayonnements ionisants et les neutrons.

Les huiles deviennent plus visqueuses (moins fluides, plus résistantes à l'écoulement). Certaines huiles se solidifient même, formant des polymères ressemblant à du goudron. Ces phénomènes réduisent ou arrêtent l'écoulement dans une certaine mesure.

Note :

Les graisses à base d'huile de savon, par contre, deviennent moins visqueuses, et plus fluides parce que le rayonnement brise les molécules du liant à base de savon. Le rayonnement augmente le taux d'oxydation par l'air, ce qui réduit également la quantité de rayonnement requis pour causer des dommages importants.

L'oxydation favorisée par le rayonnement et d'autres dommages peuvent être limités si l'on utilise une graisse contenant des additifs spéciaux.

Ces deux types de lubrifiants employés dans les machines de chargement du combustible sont changés plus fréquemment que ceux utilisés dans d'autres types d'équipement non exposé au rayonnement.

4.2.2 Plastiques

Les plastiques sont constitués de longues chaînes de molécules (polymères) et d'autres produits chimiques qui contrôlent certaines de leurs propriétés. Les liens chimiques sont très sensibles au rayonnement, qui peut endommager gravement leurs propriétés. Les types de changements chimiques et structuraux qui sont causés par le rayonnement comprennent notamment :

- La fragilisation et l'accroissement de la rigidité en raison des liaisons transversales des atomes qui s'établissent entre les chaînes;
- La perte de résistance mécanique due à la fragmentation des polymères à chaîne courte. Le teflon et le plexiglas sont très susceptibles de subir ce processus;
- La fragilisation et la rigidité dues à la formation de nouveaux polymères à chaîne longue;
- La fragilisation et la rigidité accrue des liaisons transversales oxydantes;
- Le dégagement de gaz.

Les problèmes ayant été causés par des dommages dus au rayonnement et subis par des plastiques dans des centrales nucléaires comprennent notamment :

- Les dommages causés à l'isolation des câbles d'alimentation et des câbles de commande, particulièrement ceux qui se trouvent dans la voûte du réacteur;
- Les dommages causés à la gaine extérieure des câbles de certains instruments à chambre d'ionisation, qui ont été tellement abîmés qu'ils sont devenus fragiles, fissurés et qu'ils sont tombés. Les

Note :

matériaux d'isolation dans les raccords associés sont également devenus fragiles et défectueux;

- La décomposition de blocs de branchement à l'intérieur des boîtes de connexion ayant été exposés à des champs de rayonnement élevés;
- Des dommages causés aux résines échangeuses d'ions, qui sont des polymères (polystyrène). Les radionucléides retirés des circuits d'eau actifs déposent une bonne partie de leur énergie dans le lit de résine, ce qui mène à leur détérioration.

Des programmes ont été mis en place pour gérer les effets de ces problèmes.

4.2.3 Métaux

Les neutrons rapides modifient les propriétés mécaniques des métaux (et d'autres matériaux) comme suit :

- Ils augmentent leur résistance à la traction;
- La limite conventionnelle de proportionnalité du métal augmente considérablement;
- La dureté du métal s'accroît;
- La ductilité diminue.

Les neutrons rapides laissent des espaces libres et entraînent une réorganisation des atomes dans le métal endommagé.

Ceux-ci brisent la structure cristalline et génèrent des contraintes internes, qui accroissent l'énergie, requise pour déformer le métal.

Si le métal endommagé par le rayonnement est recuit à environ 850 à 1000 °C, les propriétés reviennent presque à leur valeur originale. Cela s'explique par le fait que les défauts deviennent mobiles à des températures élevées, et se déplacent vers des endroits de prédilection, ce qui élimine certains des défauts. Ce phénomène n'est pas nécessairement une bonne chose, car le processus favorise le fluage.

4.2.4 Aciers au carbone

Les aciers au carbone profitent de l'accroissement de leur résistance mécanique conféré par une irradiation par les neutrons rapides, mais au prix d'un risque accru de rupture fragile. Deux types de composants CANDU montrent une augmentation de la température de transition ductile-fragile lorsqu'ils sont irradiés :

- La résistance au choc de nombreuses cuves sous pression qui fonctionnent à la température ambiante est réduite. La fragilité induite par le rayonnement des cuves sous pression qui fonctionnent

Note :

à 260 °C n'est pas corrigée par le recuit, parce que la température est trop basse.

- La température de transition ductile-fragile des conduites en aciers au carbone dans le circuit caloporteur augmente graduellement au cours de leur longue durée d'utilisation.

4.2.5 Alliages de zirconium

Bien que l'irradiation ait les mêmes effets sur les propriétés mécaniques des alliages de zirconium que sur celles des alliages en aciers au carbone, l'érouissage du matériau avant l'installation réduit les changements.

La vitesse de fluage augmente, ce qui réduit considérablement la durée d'utilisation prévue des tubes de force en alliages de zirconium.

La gaine du combustible faite en alliage de zirconium devient plus dure et fragilisée par le rayonnement. Cela ne réduit pas de manière significative sa durée de vie, mais réduit le nombre de positions dans lesquelles on peut placer le combustible pour éviter les problèmes de manutention après que les grappes de combustible ont été retirées du réacteur.

4.2.6 Béton

Comme tous les matériaux, le béton, largement utilisé dans les centrales nucléaires pour des applications structurales et de blindage contre le rayonnement, est susceptible de subir des dommages causés par le rayonnement. Le rayonnement gamma est absorbé et converti en chaleur. Les neutrons dégagent également de l'énergie sous forme de chaleur et activent le cobalt et d'autres métaux dans les barres d'armature.

Le rayonnement gamma et le bombardement par les neutrons affectent l'intégrité structurale et les propriétés de blindage de deux manières :

- La chaleur chasse l'eau hors du béton, ce qui donne lieu à des contraintes internes, à la fissuration et à un éclatement des pièces en béton depuis la surface.
- L'eau dans le béton ralentit les neutrons, ce qui cause une thermalisation; elle sert de barrière de protection efficace contre les rayonnements. La perte d'eau due à la chaleur produite par le rayonnement réduit l'efficacité de blindage contre les neutrons du béton. Il s'agit d'une question très importante car le béton sert d'écran biologique qui protège les travailleurs de centrale contre le rayonnement.

Note :

Deux méthodes sont employées dans les centrales CANDU pour réduire les effets du rayonnement sur le béton et pour maintenir son efficacité comme blindage :

- Dans les anciennes centrales, les parois épaisses en béton servaient d'écran biologique. Un circuit de conduite était aménagé dans le béton et de l'eau froide circulait afin d'évacuer la chaleur produite par le rayonnement.
- Dans d'autres centrales, un blindage thermique et biologique rempli d'eau est utilisé. Les parois en béton au-delà de ce blindage ne sont pas assez chauffées pour justifier la présence de conduites de refroidissement.

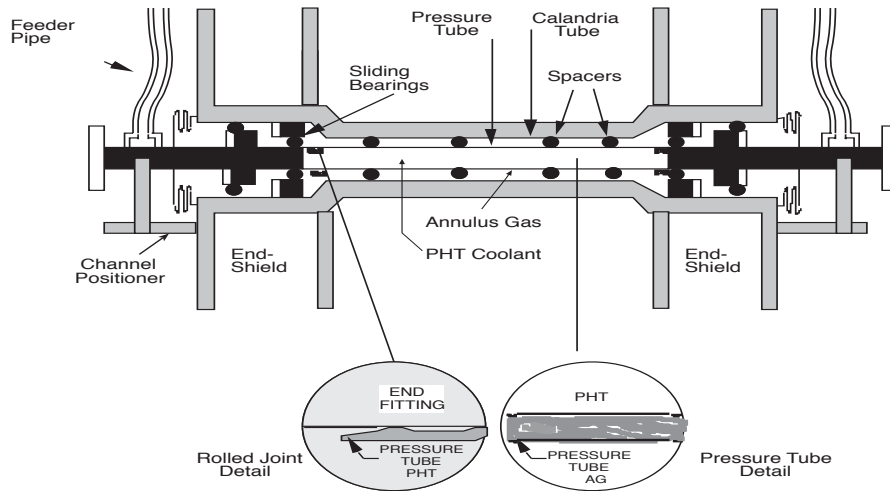
4.2.7 Facteurs ayant une incidence sur le fluage des tubes de force

Le fluage a été examiné de façon détaillée précédemment. On se souvient que le fluage est un processus par lequel les métaux assujettis à des contraintes constantes à haute température se déforment graduellement et de manière permanente.

À de faibles températures ambiantes, le rayonnement ionisant et les neutrons durcissent les matériaux et réduisent leur ductilité ainsi que leur vitesse de fluage. À des températures élevées, par contre, la formation et le mouvement des défauts causent en réalité une augmentation des vitesses de fluage.

L'allongement des tubes de force dû à la dilatation thermique et au fluage est une préoccupation importante dans les réacteurs CANDU. Ce phénomène se produit en dépit du fait que les concepteurs ont prévu l'allongement et choisi des alliages de zirconium plutôt que du zirconium pur, raison de leur résistance mécanique plus élevée et de leur résistance au fluage.

Note :



Note :

Figure 1
Schéma d'un canal de combustible

- Feeder Pipe : Conduites d'alimentation
 Channel Positioner : Positionneur de canal
 End-shield : Bouclier d'extrémité
 Sliding Bearings : Paliers de glissement
 Pressure Tube : Tube de force
 Calandria Tube : Tube de calandre
 Spacers : Anneaux d'espacement
 Annulus Gas : Gaz de l'espace annulaire
 PHT Coolant : Caloporteur du CCP
 End-shield : Bouclier d'extrémité
 Rolled Joint Detail : Détail d'un joint d'extrémité
 End Fitting : Bouclier d'extrémité
 Pressure Tube – PHT : Tube de force - CCP
 PHT : CCP
 Pressure Tube – AG : Tube de force - GA
 Pressure Tube Detail : Détail du tube de force

Le mécanisme d'appui des tubes de force dans les canaux de combustible est indiqué à la figure 1. Le fluage longitudinal (fluage le long de l'axe des tubes) est influencé par les facteurs suivants :

- Contrainte appliquée - la vitesse de fluage augmente en fonction de l'augmentation de la charge;
- Le flux neutronique à température élevée; comme nous l'avons expliqué précédemment, un flux neutronique accru à des températures élevées augmente la vitesse de fluage;

- Écrouissage antérieur; l'écrouissage augmente la résistance mécanique et la résistance à la déformation, mais l'écrouissage durant la fabrication augmente la vitesse de fluage;
- Propagation du rayonnement; certains matériaux, comme les alliages de zirconium utilisés dans les tubes de force, possèdent des propriétés différentes dans des orientations différentes (pour cette raison, on les dit anisotropes). Sous l'effet du rayonnement, les effets des différences dans les propriétés cristallines causent un allongement de la longueur des tubes, ce qui aggrave encore plus les problèmes de fluage.

Note :

Les problèmes possibles dus à un allongement excessif des tubes de force comprennent :

- Le palier lisse peut s'accrocher sur l'extrémité de la gaine qui est fixée à l'intérieur de la face du réacteur. Cela empêche la gaine de bouger lorsque le tube se contracte durant le refroidissement, ce qui génère des contraintes élevées sur la face du réacteur;
- L'obliquité sur le bouclier d'extrémité lors de l'enlèvement rend difficile l'alignement de la machine de chargement du combustible;
- Le contact possible entre les conduites d'alimentation. Ce type de contact cause l'usure de contact et des charges additionnelles sur les assemblages de raccordement des conduites d'alimentation. Dans les cas extrêmes, l'usure de contact risque de compromettre la limite de pression du CCP.

À noter que puisque la vitesse de fluage dépend du flux neutronique, des variations importantes de l'allongement du tube entre les canaux adjacents risquent de se produire, ce qui réduit les espacements d'alimentation initiaux et augmente la possibilité que les conduites d'alimentation se touchent.

La vitesse de fluage réelle « s » dans certaines tranches se situe entre 3,2 et 4,6 mm par année. Les anciennes tranches dotées d'une extrémité flottante unique avaient une tolérance totale d'environ 40 mm. Il est clair que cette tolérance n'est pas suffisante pour une durée de vie en service de 30 ans. Les conceptions plus récentes, dont les deux extrémités du tube sont fixées ou flottantes, ce qui permet une croissance axiale allant jusqu'à 160 mm, permettent une durée de vie en service d'au moins 30 ans.

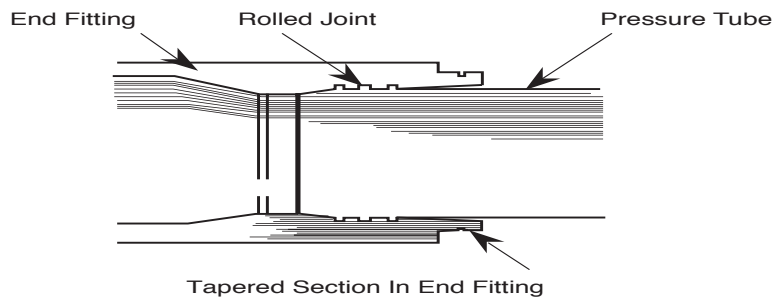
D'autres procédures visant à minimiser l'allongement des tubes de force ont été mises au point dans le cadre du programme de réadaptation des tubes de force. Le remplacement à grande échelle des canaux de combustible permet de réduire l'allongement des tubes de force, mais il

a été mis au point essentiellement en vue de réduire le problème de fissuration par hydruration retardée (FHR).

Note :

4.3 FRAGILISATION PAR L'HYDROGÈNE, FISSURATION PAR HYDRURATION RETARDÉE, FORMATION DE BOURSOUFLURES DANS LES TUBES DE FORCE ET FACTEURS CONTRIBUTIFS

Les tubes de force contiennent environ 10 ppm d'hydrogène résiduel imputable au procédé de fabrication.



Rolling

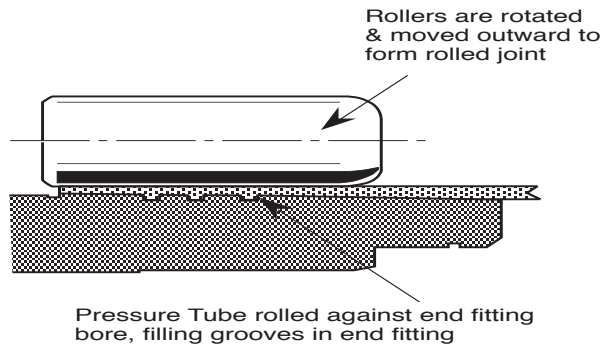


Figure 2

Joint dudgeonné entre le tube de force et les boucliers d'extrémité

End fitting : Bouclier d'extrémité

Rolled Joint : Joint dudgeonné

Pressure Tube : Tube de force

Tapered Section in End Fitting : Partie effilée du bouclier d'extrémité

Rolling : Laminage

Rollers are rotated and moved outward to form rolled joint : Les cylindres roulent et se déplacent pour former le joint dudgeonné

Pressure Tube rolled against end fitting bore, filling grooves in end fitting : Les tubes de force sont laminés contre l'orifice du bouclier d'extrémité, aplatisant les sillons dans le bouclier d'extrémité

Note :

L'hydrogène (deutérium gazeux) est également produit dans le CCP par la radiolyse de l'eau, par la réaction chimique de l'eau avec le zirconium, et l'hydrogène gazeux est ajouté dans le but de contrôler l'oxygène, qui autrement causerait des problèmes de corrosion. L'hydrogène/deutérium gazeux tend à être absorbé par le matériau des tubes de force, particulièrement dans la zone du joint dudgeonné. L'hydrogène a tendance à s'accumuler dans les zones où les contraintes sont élevées, c'est-à-dire aux joints dudgeonnés. Le joint dudgeonné est illustré à la figure 2.

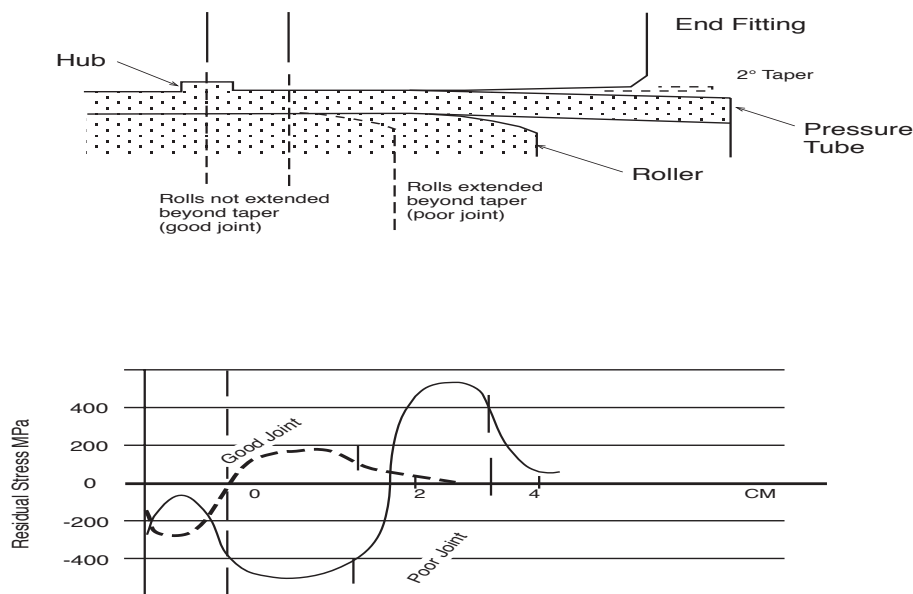


Figure 3

Position relative du cylindre durant l'installation, ce qui génère des contraintes résiduelles dans le joint

Hub : Moyeu

Rolls not extended beyond taper (good joint) : Les cylindres ne dépassent pas l'extrémité conique (bon joint)

Rolls extended beyond taper (poor joint) : Les cylindres dépassent l'extrémité conique (mauvais joint)

End Fitting : Bouchon du bouclier d'extrémité

Taper : Extrémité conique

Pressure Tube : Tube de force

Roller : Cylindre

Residual Stress (MPa) : Contraintes résiduelles (MPa)

Good joint : Bon joint

Poor joint : Mauvais joint

Note :

Pour former un joint, la paroi du tube de force est comprimée dans des sillons aux boucliers d'extrémité par des cylindres. Durant le laminage, le cylindre a été poussé trop loin (à environ 13 mm) dans le bouclier d'extrémité. Par conséquent, la paroi du tube de force a été dilatée à l'extrémité conique du bouclier d'extrémité. Cela crée une autre zone de déformation dans l'épaisseur de la paroi du tube, où des contraintes de traction résiduelles élevées se sont accumulées (voir figure 3).

L'examen en laboratoire des tubes de force défectueux a révélé la présence de fissures dans une zone près du joint dudgeonné.

Après avoir rencontré ces problèmes, on a mis au point des procédures de laminage améliorées et modifié le style de joint (dégagement plus bas entre le tube de force et le bouclier d'extrémité) dans tous les réacteurs. De faibles niveaux de contraintes résiduelles au joint dudgeonné ont été assurés grâce à ces améliorations.

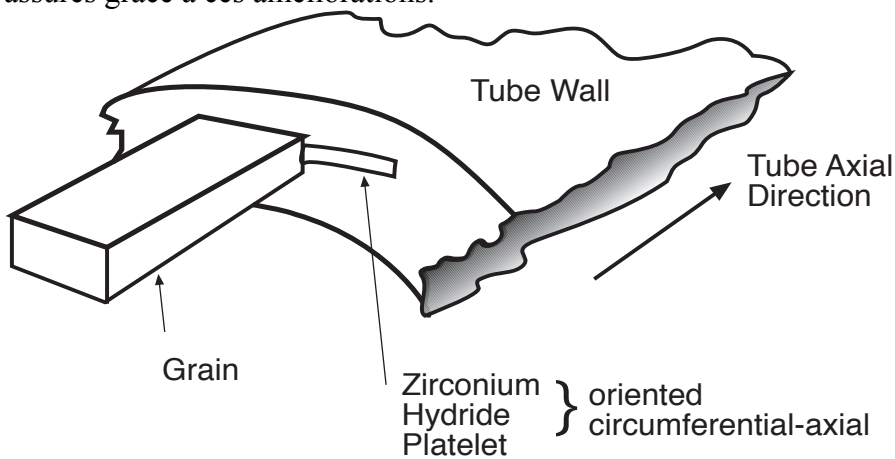


Figure 4a
Microstructure normale des tubes de force et orientation
des plaquettes d'hydrure de zirconium

Tube Wall : Paroi du tube

Tube Axial Direction : Direction axiale du tube

Grain : Grain

Zirconium Hydride Platelet oriented circumferential-axial : Plaquettes d'hydrure de zirconium orientées de manière circonférentielle-axiale

Note :

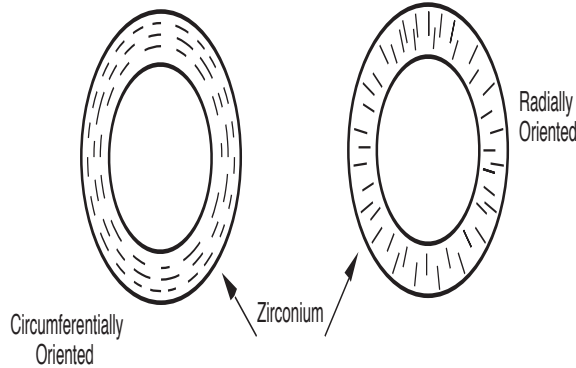


Figure 4b

Représentation de l'orientation des plaquettes d'hydrure de zirconium précipité dans les tubes de force

Circumferentially Oriented : Orientation circonférentielle

Zirconium : Zirconium

Radially Oriented : Orientation radiale

Les trois voies par lesquelles le gaz pénètre dans le métal du tube sont les suivantes :

- Diffusion du deutérium dans les boucliers d'extrémité en acier inoxydable et le long de ces boucliers, ainsi que de part et d'autre du joint dudgeonné (l'acier inoxydable est passablement perméable à l'hydrogène/au deutérium gazeux);
- Migration à travers la couche d'oxyde protectrice sur la paroi interne du tube de force;
- Absorption à travers l'oxyde de surface du côté du gaz de l'espace annulaire du tube de force – ce processus d'absorption peut être très rapide si l'intégrité de l'oxyde de surface est maintenue, c'est-à-dire par un contrôle de l'oxygène. Le deutérium gazeux aura migré vers l'espace annulaire par le bouclier d'extrémité.

La fragilisation par l'hydrogène dans les tubes de force est causée par la formation d'hydrure de zirconium, un composé qui possède un volume plus grand que le zirconium métal correspondant. L'hydrure précipite dans la matrice métallique (à l'exemple des flocons de maïs) et génère des contraintes et des déformations dans la pièce. La figure 4.4a) illustre

la microstructure normale des tubes de force et l'orientation des plaquettes d'hydrure de zirconium.

Au cours de la fabrication, les tubes sont écrouis (c'est-à-dire qu'ils sont étirés suivant un plan axial, ce qui amincit les parois et réduit le diamètre). Les déformations causées par la fabrication tendent à orienter les hydrures précipités suivant une orientation circonférentielle. C'est l'orientation préférentielle des hydrures dans des conditions de répartition normale des contraintes dans la paroi du tube.

Le laminage à outrance génère des contraintes de traction résiduelles élevées sur la face intérieure des tubes, juste du côté intérieur des joints dudgeonnés. Cela a pour effet d'orienter les plaquettes d'hydrure précipité dans une direction radiale, ce qui cause une fissuration du tube depuis l'intérieur vers l'extérieur. La figure 4b) indique les orientations circonférentielle et radiale des plaquettes d'hydrure de zirconium. Ainsi, les pièces déformées par un laminage à outrance deviennent alors susceptibles de subir la formation et la propagation de fissures. Cela s'explique par le fait que la pression principale est perpendiculaire à l'orientation des plaquettes d'hydrure.

L'hydrogène/deutérium gazeux qui a atteint le matériau des tubes de force est dissous dans le métal à des températures supérieures à 150 °C. Sous 150 °C, l'hydrogène forme des bulles de gaz minuscules parce que la solubilité du gaz diminue avec la température. Les restrictions opérationnelles imputables à ce phénomène seront examinées ci-après. On croit que le mécanisme par lequel la fissuration par hydruration retardée se produit est le suivant :

- Les molécules d'hydrogène diffusent vers des zones où les contraintes sont élevées, comme les joints dudgeonnés, ou vers les défauts localisés comme les entailles et les fissures, où il y a une concentration des contraintes. L'hydrogène peut se combiner chimiquement au zirconium et former des plaquettes d'hydrure de zirconium.
- Les plaquettes d'hydrure de zirconium se dissolvent à nouveau lorsque la température dépasse 150 °C.
- Les hydrures de zirconium sont très fragiles, et se brisent immédiatement sous l'effet de charges de traction.
- La pressurisation des canaux de combustible avec des plaquettes naturellement orientées ajoute suffisamment de contraintes pour causer une fissuration des hydrures. L'écrouissage des alliages de zirconium permet d'observer que le processus suit les étapes suivantes :

Note :

Précipitation et réorientation des plaquettes d'hydrure à la tête de fissure, due au plus grand nombre de contraintes qui s'y trouvent;
Rupture fragile par la précipitation des hydrures, lorsque les plaquettes atteignent une taille critique;
Propagation des fissures se poursuit à mesure que les hydrures qui se forment à la nouvelle tête de fissure se brisent, ce qui cause une amplification de la rupture. La figure 5 illustre ce processus.

Note :

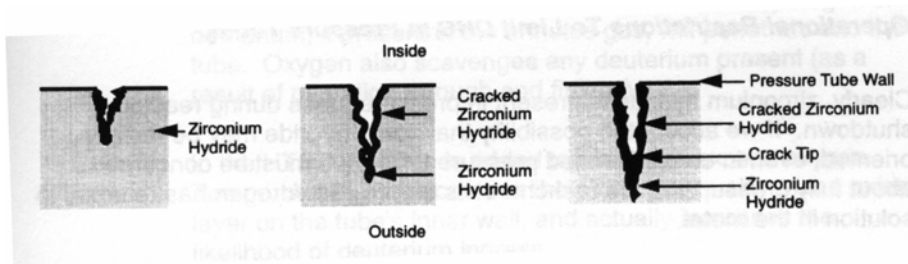


Figure 5

Représentation schématique de la propagation d'une fissure suite à la rupture des hydrures de zirconium qui précipitent à la tête de fissure

Zirconium Hydride : Hydrure de zirconium

Inside : Intérieur

Cracked Zirconium Hydride : Hydrure de zirconium fissuré

Outside : Extérieur

Pressure Tube Wall : Paroi du tube de force

Cracked Zirconium Hydride : Hydrure de zirconium fissuré

Crack Tip : Tête de fissure

Zirconium Hydride : Hydrure de zirconium

Certains hydrures de zirconium qui doivent être présents dans les tubes de force durant la mise à l'arrêt (température inférieure à 150 °C) peuvent être orientés de telle sorte qu'il y a un risque de fissuration du tube si les tubes sont pressurisés de manière inappropriée avant que tous les hydrures se soient dissous à nouveau dans le métal.

L'expérience montre que le risque est plus élevé lorsque la température dans le CCP se situe entre 100 °C et 200 °C. Les procédures qui restreignent le fonctionnement dans cette plage de températures et qui nécessitent le passage par cette plage doivent être faites le plus rapidement possible durant le réchauffement et le refroidissement de la tranche.

Pour limiter davantage les niveaux de contraintes, cette transition doit se produire à des pressions inférieures à la pression d'exploitation normale.

Les hydrures subiront alors moins de contraintes pour une durée minimale, ce qui réduira la probabilité que des fissures traversant entièrement la paroi se produisent à cause de la FHR.

Note :

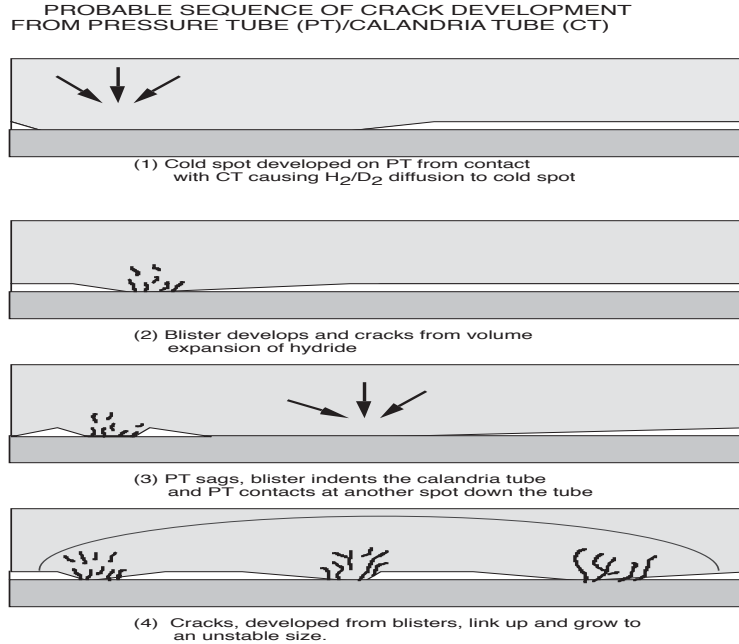
On croit que la formation de boursouflures par hydratation est due à l'affaissement des tubes de force chauds qui entrent en contact avec le tube de calandre qui est plus froid. Deux conditions sont associées à ce phénomène :

- Le fluage-affaissement, qui est défini comme étant la déflexion des tubes de force par rapport à leur axe vertical, en raison des changements dans la courbe causée par le flux neutronique, la pesanteur et la température. Les tubes s'affaissent.
- L'absence d'anneaux d'espacement, ou le fait qu'ils soient déplacés ou mal placés (ressorts-bracelet).

Le gradient de température important dans le tube de force au point de contact (point froid) mène alors à la formation de boursouflures d'hydruration et à la fissuration, tel qu'indiqué à la figure 6.

L'hydrogène présent dans le tube diffuse le gradient de température, regroupant et formant des dépôts d'hydrures sur la paroi externe du tube. Comme l'hydrure possède un volume supérieur de 17 % au volume du métal du tube qu'il déplace, des boursouflures se forment sur la surface extérieure du tube.

Des fissures peuvent s'amorcer et se former dans les zones comportant des boursouflures. Comme la zone de contact entre le tube de force et le tube de calandre a tendance à être longue, une série de boursouflures peut se former à la base du tube de force. Les boursouflures sont extrêmement fragiles, et peuvent se fissurer.



Note :

Figure 6
Développement de boursouflures d'hydruration et de fissures

Séquence probable du développement d'une fissure dans un tube de force (TF)/tube de calandre (TC)

- (1) Point froid qui se développe sur le TF à cause du contact avec le TC, ce qui cause une diffusion H_2/D_2 vers le point froid
- (2) Une boursouffure se développe et se fissure à cause de l'augmentation du volume de l'hydrure
- (3) Affaissement du TF, des boursouffures marquent le tube de calandre et le TF entre en contact avec un autre point sur le tube
- (4) Des fissures se forment à cause des boursouffures, se multiplient et finissent par atteindre une taille instable.

Une solution technique (emplacement de l'anneau d'espacement et repositionnement ou SLAR) pour régler le problème de la formation de boursouffures et des fissures connexes a été mise au point.

4.4 RÉDUIRE AU MINIMUM LA FISSURATION PAR HYDRURATION RETARDÉE DURANT LE DÉMARRAGE ET LE REFROIDISSEMENT DE LA TRANCHE

Comme nous l'avons vu précédemment, le risque de fissuration par hydruration retardée due à la formation de plaquettes d'hydrure de

zirconium est à son maximum dans la plage relativement étroite de températures de 150 °C à 200 °C.

À des températures inférieures à 150 °C, l'hydrogène est pratiquement insoluble dans l'alliage de zirconium et à des températures supérieures à la plage 150 °C à 200 °C, les hydrures sont complètement solubles. Pour ces raisons, le risque de fissuration par hydruration retardée est réduit au minimum en passant par la plage de températures critiques le plus rapidement possible.

La présence de deutérium/d'hydrogène peut être réduite au minimum grâce à l'addition d'oxygène et par un contrôle minutieux du système d'addition de l'hydrogène dans le CCP.

Facteurs limitatifs ayant une incidence sur la durée de vie d'une grappe de combustible dans le cœur.

Durant l'exposition des pastilles de combustible UO₂ à l'irradiation par les neutrons, la grappe subit un changement dans ses dimensions linéaires et radiales. Le changement de dimensions est lié à la densité du flux de neutrons et à la durée de son exposition à ces neutrons. Ce phénomène porte le nom de propagation du rayonnement.

La gaine en zircalloy des pastilles de combustible subit une fragilisation lorsqu'elle est exposée à un flux de neutrons. La densité du flux de neutrons et la durée de l'exposition ont une incidence sur l'importance de la fragilisation. Ce phénomène porte le nom de fragilisation par les neutrons. La fragilisation par les neutrons a pour effet de faire perdre à la gaine de zircalloy sa durabilité et la ténacité, de telle sorte que la fragilisation progresse, et toute contrainte additionnelle imposée à la gaine est davantage susceptible de causer une fissuration plutôt qu'une déformation normale, comme on l'observerait dans un matériau tenace et durable.

Comme la gaine de zircalloy devient plus fragile, la pastille de UO₂ à l'intérieur continue à croître. Après un certain temps et après l'irradiation par les neutrons, la pastille plus grosse commence à exercer des contraintes élevées sur la gaine fragilisée, et après un certain temps, la gaine se fissure, libérant des produits de fission gazeux dans le circuit caloporteur primaire.

Pour cette raison, on retire les grappes de combustible du cœur alors qu'elles sont encore raisonnablement ductiles, et avant que le risque de dégagement de produits de fission soit plus grand.

Note :

QUESTIONS DE RÉVISION

TUBES DE FORCE ET GRAPPES DE COMBUSTIBLE

Note :

1. Dire comment les neutrons rapides affectent chacune des propriétés suivantes des métaux.
 - Résistance à la traction
 - Limite conventionnelle de proportionnalité
 - Dureté
 - Ductilité
2. Décrire les effets des neutrons et des rayonnements ionisants sur l'huile et les graisses à base de savon.
3. La perte d'eau par le béton réduit l'efficacité du béton comme matériau de blindage biologique. Expliquer brièvement le processus qui cause ce phénomène.
4. Mentionner quatre facteurs qui ont une incidence sur le fluage des tubes de force.
5. Mentionner trois sources d'hydrogène dans les tubes de force.
6. Décrire le processus de fragilisation d'un tube de force par l'hydrogène.
7. Expliquer comment l'orientation des plaquettes d'hydrure de zirconium affecte la résistance à la traction du tube de force.
8. Décrire le mécanisme par lequel la fissuration par hydruration retardée se produit.
9. Décrire comment les boursouffures causées par l'hydrogène se forment sur la partie extérieure des tubes de force.