

Réacteurs à neutrons intermédiaires et auxiliaires

Table des matières

1	OBJECTIFS	1
1.1	INTRODUCTION	1
1.2	MODÉRATEUR	1
1.2.1	<i>Modérateur (eau lourde).....</i>	<i>1</i>
1.2.2	<i>Circuit du modérateur.....</i>	<i>1</i>
1.2.3	<i>Circuit du gaz de couverture et contrôle de la pression...2</i>	<i>2</i>
1.2.4	<i>Système d'addition de poison liquide au modérateur</i>	<i>2</i>
1.2.5	<i>Circuit d'épuration du modérateur</i>	<i>3</i>
1.3	CIRCUIT CALOPORTEUR	3
1.3.1	<i>Sources de chaleur et transfert thermique du CC.....</i>	<i>3</i>
1.3.2	<i>Contrôle de la pression et de l'inventaire dans le CC</i>	<i>4</i>
1.3.3	<i>Fonctionnement pendant la mise à l'arrêt du circuit caloporteur.....</i>	<i>6</i>
1.3.4	<i>Eau lourde du CC</i>	<i>6</i>
1.3.5	<i>Auxiliaires du circuit caloporteur.....</i>	<i>7</i>
1.4	SYSTÈMES SPÉCIAUX DE SÛRETÉ	8
1.4.1	<i>Systèmes d'arrêt d'urgence</i>	<i>8</i>
1.4.2	<i>Refroidissement d'urgence du cœur par injection</i>	<i>9</i>
1.4.3	<i>Confinement</i>	<i>10</i>
1.5	CIRCUITS DU RÉACTEUR.....	11
1.5.1	<i>Circuit du gaz annulaire</i>	<i>11</i>
1.5.2	<i>Circuits de refroidissement des boucliers d'extrémité</i>	<i>11</i>
1.6	COMBUSTIBLE.....	12
1.6.1	<i>Comportement du combustible</i>	<i>12</i>
1.6.2	<i>Manutention du combustible.....</i>	<i>13</i>
2	MODÉRATEUR	15
2.1	MODÉRATEUR (EAU LOURDE)	15
2.1.1	<i>Teneur isotopique du modérateur.....</i>	<i>15</i>
2.1.2	<i>Préoccupations radiologiques relatives au modérateur.18</i>	<i>18</i>
2.1.3	<i>Modérateur (D₂O) déversé pendant la mise à l'arrêt</i>	<i>20</i>
2.1.4	<i>Modérateur (D₂O) déversé en régime de puissance</i>	<i>20</i>
2.1.5	<i>Modérateur (D₂O) contenu dans les conduites en régime de puissance</i>	<i>21</i>
2.1.6	<i>Garantie de mise à l'arrêt du réacteur</i>	<i>21</i>
2.1.7	<i>Notions principales</i>	<i>22</i>
2.2	CIRCUIT DU MODÉRATEUR	23
2.2.1	<i>Production de chaleur.....</i>	<i>24</i>
2.2.2	<i>Évacuation de la chaleur</i>	<i>25</i>

2.2.3	<i>Contrôle de la température du modérateur</i>	25
2.2.4	<i>Niveau du modérateur</i>	26
2.2.5	<i>Conditions anormales</i>	27
2.2.6	<i>Notions principales</i>	28
2.3	CIRCULATION DU GAZ DE COUVERTURE ET CONTRÔLE DE LA PRESSION	29
2.3.1	<i>Limites d'explosion</i>	30
2.3.2	<i>Concentrations de D₂ et de O₂ dans le gaz de couverture</i>	30
2.3.3	<i>Circulation du gaz de couverture</i>	31
2.3.4	<i>Purge du gaz de couverture</i>	31
2.3.5	<i>Surveillance du gaz de couverture</i>	32
2.3.6	<i>Conditions anormales</i>	32
2.3.7	<i>Notions principales</i>	34
2.4	CIRCUIT DU POISON LIQUIDE DU MODÉRATEUR	36
2.4.1	<i>Description du système</i>	37
2.4.2	<i>Fonctionnement normal</i>	38
2.4.3	<i>Surveillance et contrôle</i>	46
2.4.4	<i>Situations opérationnelles anormales</i>	49
2.4.5	<i>Notions principales</i>	50
2.5	CIRCUIT D'ÉPURATION DU MODÉRATEUR	52
2.5.1	<i>Pureté du modérateur</i>	53
2.5.2	<i>Modes de fonctionnement du système</i>	53
2.5.3	<i>Paramètres de fonctionnement</i>	57
2.5.4	<i>Fonctionnement durant l'état d'arrêt garanti</i>	60
2.5.5	<i>Notions principales</i>	60
2.6	EXERCICES	62
2.6.1	<i>Modérateur (eau lourde)</i>	62
2.6.2	<i>Système de circulation du modérateur</i>	62
2.6.3	<i>Circuit du gaz de couverture</i>	62
2.6.4	<i>Addition d'un poison</i>	63
2.6.5	<i>Épuration du modérateur</i>	65
3	CIRCUIT CALOPORTEUR	67
3.1	SOURCES DE CHALEUR DU CC ET TRAJETS DE TRANSFERT DE CHALEUR 67	
3.1.1	<i>Fonctionnement du réacteur à pleine puissance</i>	67
3.1.2	<i>Évitement de l'empoisonnement</i>	70
3.1.3	<i>Fissuration par hydruration retardée</i>	72
3.1.4	<i>Dangers</i>	73
3.1.5	<i>Dangers causés par l'hydrogène lorsque le circuit est froid</i>	73
3.1.6	<i>Notions principales</i>	74
3.2	CONTRÔLE DE LA PRESSION ET DE L'INVENTAIRE DANS LE CC	74
3.2.1	<i>Contrôle de la pression</i>	75

3.2.2	<i>Contrôle de la pression dans le circuit caloporteur</i>	76
3.2.3	<i>Contrôle du niveau du pressuriseur</i>	83
3.2.4	<i>Réponse de l'alimentation et de la purge aux changements de puissance</i>	85
3.2.5	<i>Transfert et stockage du D₂O</i>	86
3.2.6	<i>Purge hors du circuit</i>	89
3.2.7	<i>Purge/Épuration à l'aide des condenseurs de purge</i>	89
3.2.8	<i>Purge/épuration à l'aide du condenseur du dégazeur</i>	92
3.2.9	<i>Manœuvres de puissance</i>	94
3.2.10	<i>Notions principales</i>	97
3.2.11	<i>Décharge du CC</i>	98
3.2.12	<i>Méthodes de réduction de la pression dans le CC</i>	100
3.2.13	<i>Notions principales</i>	105
3.2.14	<i>Défaillances graves</i>	106
3.3	MISE À L'ARRÊT DU CIRCUIT CALOPORTEUR	111
3.3.1	<i>Types de systèmes de refroidissement à l'arrêt</i>	111
3.3.2	<i>Notions principales</i>	121
3.3.3	<i>Thermosiphon</i>	121
3.3.4	<i>Refroidissement rapide</i>	124
3.3.5	<i>Refroidissement d'urgence à l'aide du refroidissement à l'arrêt</i>	125
3.3.6	<i>Notions principales</i>	126
3.4	EAU LOURDE DU CC	127
3.4.1	<i>Limites de la teneur isotopique</i>	127
3.4.2	<i>Baisse de la teneur isotopique du D₂O dans le CC</i>	128
3.4.3	<i>Dangers radiologiques</i>	130
3.4.4	<i>Notions principales</i>	131
3.4.5	<i>Circuits de collecte du D₂O du circuit caloporteur</i>	132
3.4.6	<i>Notions principales</i>	138
3.4.7	<i>Fuites de D₂O dans le CC</i>	138
3.4.8	<i>Notions principales</i>	140
3.5	AUXILIAIRES DU CIRCUIT CALOPORTEUR	140
3.5.1	<i>Circuit d'épuration du circuit caloporteur</i>	140
3.5.2	<i>ΔP d'épuration</i>	146
3.5.3	<i>Conditions de fonctionnement anormales</i>	147
3.5.4	<i>Notions principales</i>	148
3.5.5	<i>Système d'addition d'hydrogène dans le circuit caloporteur</i>	149
3.5.6	<i>Notions principales</i>	152
3.5.7	<i>Circuit d'alimentation du joint d'étanchéité du circuit caloporteur</i>	152
3.6	EXERCICES	159
3.6.1	<i>Transfert de chaleur</i>	159
3.6.2	<i>Contrôle de la pression et de l'inventaire</i>	159

3.6.3	<i>Refroidissement à l'arrêt</i>	162
3.6.4	<i>Eau lourde</i>	163
3.6.5	<i>Auxiliaires du circuit caloporteur</i>	164
4	SYSTÈMES DE SÛRETÉ SPÉCIAUX	166
4.1	SYSTÈMES D'ARRÊT D'URGENCE.....	166
4.1.1	<i>Efficacité des systèmes d'arrêt d'urgence</i>	166
4.1.2	<i>Types de systèmes d'arrêt</i>	167
4.1.3	<i>Récupération après le déclenchement du système d'arrêt</i>	168
4.1.4	<i>Principes de sûreté</i>	168
4.1.5	<i>Résumé des notions clés</i>	169
4.2	REFROIDISSEMENT D'URGENCE DU CŒUR PAR INJECTION	170
4.2.1	<i>Rôle du SRUC par injection</i>	171
4.2.2	<i>Accident dû à la perte de réfrigérant primaire (APRP)</i>	179
4.2.3	<i>Exigences relatives au système d'appui</i>	180
4.2.4	<i>Initiation du SRUC</i>	182
4.2.5	<i>Phases du SRUC par injection</i>	182
4.2.6	<i>Fonctionnement du SRUC par injection</i>	187
4.2.7	<i>Fiabilité du système de refroidissement d'urgence du cœur par injection</i>	188
4.2.8	<i>Différents états du SRUC par injection</i>	188
4.2.9	<i>Notions principales</i>	190
4.3	CONFINEMENT	192
4.3.1	<i>TYPES DE CONFINEMENT</i>	196
4.3.2	<i>Confinement à suppression de pression (CSP)</i>	197
4.3.3	<i>Fonctionnement du CSP durant un petit APRP</i>	199
4.3.4	<i>Fonctionnement du CSP durant un APRP grave</i>	200
4.3.5	<i>Notions principales</i>	200
4.3.6	<i>Confinement à pression négative</i>	201
4.3.7	<i>Notions principales</i>	207
4.3.8	<i>Fonctionnement du CPN en cas d'APRP grave</i>	208
4.3.9	<i>Fonctionnement du CPN durant un petit APRP</i>	210
4.3.10	<i>Sas</i>	211
4.3.11	<i>Système de décharge d'air filtré</i>	211
4.3.12	<i>Allumeurs d'hydrogène</i>	211
4.3.13	<i>Notions principales</i>	212
4.3.14	<i>Atmosphère de l'enceinte</i>	213
4.3.15	<i>Notions principales</i>	215
4.4	EXERCICES.....	215
4.4.1	<i>Systèmes d'arrêt</i>	215
4.4.2	<i>SRUC par injection</i>	216
4.4.3	<i>Confinement</i>	217
5	CIRCUITS DU RÉACTEUR	219

5.1	CIRCUIT DU GAZ ANNULAIRE	219
5.1.1	<i>Rôle du circuit</i>	219
5.1.2	<i>Choix du gaz</i>	220
5.1.3	<i>Fonctionnement du circuit</i>	220
5.1.4	<i>Pression du gaz annulaire</i>	223
5.1.5	<i>Point de rosée</i>	223
5.1.6	<i>Purge du circuit</i>	223
5.1.7	<i>Notions principales</i>	224
5.1.8	<i>Conditions anormales dans le réacteur</i>	225
5.1.9	<i>Détermination de l'emplacement des fuites</i>	227
5.1.10	<i>Notions principales</i>	228
5.2	SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT DU BLINDAGE	229
5.2.1	<i>Boucliers d'extrémité de la calandre</i>	229
5.2.2	<i>Refroidissement des boucliers d'extrémité</i>	232
5.2.3	<i>Perte de refroidissement du bouclier d'extrémité</i>	235
5.2.4	<i>Exigences relatives au circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité</i>	236
5.2.5	<i>Boucliers thermiques</i>	237
5.2.6	<i>Blindage biologique</i>	238
5.2.7	<i>Notions principales</i>	239
5.3	EXERCICES.....	240
5.3.1	<i>Gaz annulaire</i>	240
5.3.2	<i>Refroidissement du blindage</i>	241
6	COMBUSTIBLE.....	243
6.1	COMPORTEMENT DU COMBUSTIBLE	243
6.1.1	<i>Unités de combustion</i>	244
6.1.2	<i>Mécanismes de défaillance</i>	246
6.1.3	<i>Forme du flux</i>	247
6.1.4	<i>Aspects détaillés de la forme du flux</i>	248
6.1.5	<i>Dépression du flux autour des barres absorbantes</i>	248
6.1.6	<i>Pointes de puissance locales et FPPC</i>	249
6.1.7	<i>Surchauffe du combustible</i>	251
6.1.8	<i>Limites de puissance</i>	254
6.1.9	<i>Protection contre l'assèchement</i>	256
6.2	PROTECTION CONTRE LA PUISSANCE ÉLEVÉE	257
6.2.1	<i>Accroissement de puissance limité par les systèmes NOP/ROP</i>	257
6.2.2	<i>Ensemble des formes de flux de référence</i>	258
6.2.3	<i>Paramètres de couverture du cœur de référence</i>	259
6.2.4	<i>Effet des variations dues au chargement de combustible</i>	259
6.2.5	<i>Limites du permis</i>	261
6.2.6	<i>Surveillance de la puissance de grappe</i>	263
6.2.7	<i>Notions principales</i>	265

6.2.8	<i>Détection et détermination de l'emplacement du combustible défectueux</i>	266
6.2.9	<i>Détection du combustible défectueux</i>	267
6.2.10	<i>Détermination de l'emplacement du combustible défectueux</i>	267
6.2.11	<i>Concentrations d'iode dans le circuit caloporteur</i>	269
6.2.12	<i>Notions principales</i>	270
6.3	MANUTENTION DU COMBUSTIBLE.....	271
6.3.1	<i>Considérations relatives au chargement de combustible</i>	272
6.3.2	<i>États de fonctionnement préférés</i>	275
6.4	NOTIONS PRINCIPALES	276
6.4.1	<i>Blocage des canaux</i>	277
6.4.2	<i>Manutention du combustible irradié</i>	280
6.4.3	<i>Manutention du combustible défectueux</i>	281
6.4.4	<i>Surveillance de la travée de stockage du combustible irradié</i>	281
6.4.5	<i>Notions principales</i>	284
6.5	EXERCICES.....	286
6.5.1	<i>Comportement du combustible</i>	286
6.5.2	<i>Manutention du combustible</i>	287

1 Objectifs

1.1 Introduction

Ce cours débute par une révision des principes fondamentaux et du fonctionnement d'un réacteur CANDU, faisant l'objet du cours intitulé *Principes fondamentaux des réacteurs CANDU*. Le circuit du modérateur et le circuit caloporteur, ainsi que leurs systèmes auxiliaires sont étudiés de manière plus approfondie dans ce cours que dans les *Principes fondamentaux des réacteurs CANDU*. Parmi les autres circuits faisant l'objet du présent cours, mentionnons les systèmes spéciaux de sûreté, le circuit du gaz annulaire et le circuit du bouclier d'extrémité. En outre, nous apprendrons comment réagir en cas d'événement anormal et comment faire face aux préoccupations sur le plan opérationnel.

1.2 Modérateur

1.2.1 Modérateur (eau lourde)

- Identifier une indication qui alerte l'opérateur de salle de commande d'une faible teneur isotopique.
- Énoncer les conséquences d'une baisse soudaine (importante) de la teneur isotopique du modérateur.
- Préciser les principaux dangers radiologiques associés au modérateur pendant l'exploitation du réacteur et à l'arrêt.
- Décrire deux manières d'utiliser le circuit du modérateur pour garantir la mise à l'arrêt du réacteur.

1.2.2 Circuit du modérateur

- Expliquer les conséquences possibles de l'exploitation d'un réacteur alors que la température du modérateur est trop élevée.
- Dans des conditions d'exploitation normales, préciser le niveau requis du modérateur (D₂O).
- Décrire les conséquences néfastes d'exploiter le réacteur en dehors de ce niveau dans votre centrale.
- Expliquer brièvement les conséquences néfastes des conditions anormales suivantes : perte d'eau de service vers les échangeurs de

chaleur du modérateur, perte de débit du modérateur, fuite des échangeurs de chaleur du modérateur.

1.2.3 Circuit du gaz de couverture et contrôle de la pression

- Préciser les limites d'explosion inférieures du D_2 et du O_2 dans une atmosphère d'hélium.
- Énumérer six facteurs qui ont une incidence sur la concentration de D_2 et de O_2 dans le gaz de couverture et expliquer comment chacun d'eux affecte les concentrations en gaz.
- Énumérer les états de fonctionnement qui nécessitent la circulation du gaz de couverture et donner trois raisons de cette exigence relative à la circulation.
- Expliquer les trois conditions qui nécessitent la purge du gaz de couverture.
- Expliquer quelles sont les mesures à prendre lors de la purge du gaz de couverture.
- Préciser quelles sont les deux méthodes utilisées pour s'assurer que les concentrations de D_2 , O_2 et N_2 dans le gaz de couverture se situent à l'intérieur des limites admissibles.
- Expliquer les conséquences graves possibles et les méthodes générales visant à réduire ou à compenser les conséquences de chacune des concentrations anormales suivantes de D_2 et de N_2 dans le gaz de couverture du modérateur.
- Expliquer les deux méthodes utilisées pour déterminer si le système de recombinaison du gaz de couverture fonctionne.

1.2.4 Système d'addition de poison liquide au modérateur

- Pour différents états de fonctionnement, expliquer pourquoi on peut ajouter du poison au modérateur, quelle est la nature des différents poisons et pourquoi un poison en particulier sera choisi.
- Si l'addition de poison est effectuée manuellement, énumérer quatre indications générales permettant de surveiller/contrôler l'addition de poison.
- Préciser la source d'information utilisée pour s'assurer que la quantité correcte de poison a été ajoutée au modérateur.

- Donner la raison pour laquelle il existe un système d'addition de Gd automatique.
- Énoncer le nombre de réponses/préoccupations indiquées pour une tranche, ou les indications qui se manifestent durant une circonstance anormale spécifiée.

1.2.5 Circuit d'épuration du modérateur

- Donner trois raisons pour lesquelles il est important de maintenir la pureté du modérateur.
- Préciser trois manières de contrôler la pureté du modérateur.
- Décrire l'expression « période d'épuration ».
- Préciser le contrôle primaire pour le taux d'enlèvement du poison (gadolinium).
- Expliquer pourquoi une technique d'échange d'ions multi-étapes est requise pour l'enlèvement du bore.
- Donner trois raisons pour lesquelles le bore ou le gadolinium doivent être enlevés lorsque les effets de la réactivité ne sont plus requis.
- Préciser comment les paramètres d'épuration du modérateur sont maintenus : débit d'épuration, température d'entrée de l'échange d'ions, pression d'épuration, conductivité.
- Expliquer les circonstances anormales ayant des conséquences importantes sur l'exploitation dans le circuit d'épuration du modérateur.
- Donner la raison pour laquelle le circuit d'épuration du modérateur doit être isolé lors d'un état d'arrêt garanti causé par le surempoisonnement de la tranche.

1.3 Circuit caloporteur

1.3.1 Sources de chaleur et transfert thermique du CC

- Décrire les voies de transfert thermique durant le fonctionnement normal et la procédure d'évitement de l'empoisonnement.

- Préciser et expliquer les contraintes générales exercées sur le fonctionnement du circuit caloporteur pour l'évitement de la FHR (fissuration par hydruration retardée).
- Expliquer les deux grands dangers potentiels associés au circuit caloporteur.
- Préciser deux dangers associés à l'addition d'hydrogène au CC.

1.3.2 Contrôle de la pression et de l'inventaire dans le CC

- Expliquer les raisons pour lesquelles la pression dans le CC doit être maintenue entre une limite supérieure et une limite inférieure.
- Expliquer deux préoccupations relatives à des trajets de refroidissement bloqués ou restreints.
- Préciser trois effets de l'ébullition dans le CC.
- Préciser quand l'ébullition dans le CC est admissible dans certaines centrales.
- Expliquer pourquoi il est nécessaire de disposer d'un contrôle de la pression dans le circuit CC et de l'inventaire.
- Nommer quatre rôles du circuit d'alimentation et de purge pour ce qui est des tranches dotées d'un pressuriseur lorsqu'il est en contrôle de pression en mode solide.
- Préciser le rôle du pressuriseur pendant le mode de fonctionnement normal du circuit caloporteur.
- Expliquer pourquoi le pressuriseur maintient la pression du circuit CC à une valeur prédéterminée.
- Donner cinq rôles du circuit d'alimentation et de purge dans les tranches dotées d'un pressuriseur lorsqu'il est en contrôle de pression en mode normal.
- Nommer cinq rôles du circuit d'alimentation et de purge dans les tranches sans pressuriseur.
- Donner trois raisons pour lesquelles le niveau du pressuriseur est contrôlé.

- Expliquer comment se produisent le retrait et le gonflement entre l'état pressurisé froid et la puissance zéro chaude dans les tranches sans pressuriseur.
- Expliquer deux grands rôles du circuit de transfert de D₂O entre les tranches.
- Expliquer les trois buts principaux du réservoir de stockage du D₂O du CC.
- Donner deux raisons pour lesquelles une limite de fonctionnement inférieure est appliquée au niveau du réservoir de stockage de D₂O.
- Donner deux raisons pour lesquelles une limite de fonctionnement supérieure est appliquée au niveau du réservoir de stockage de D₂O.
- Expliquer comment la pression est contrôlée dans un condenseur de purge.
- Expliquer comment la pression est contrôlée dans le condenseur du dégazeur.
- Pour les deux types de circuit CC (avec et sans pressuriseur), énoncer la réponse durant les manœuvres de puissance lente pour certains paramètres spécifiés : pression du CC, température moyenne du CC, débits d'alimentation et de purge, niveau du pressuriseur, pression du générateur de vapeur.
- Expliquer pourquoi il est nécessaire de disposer d'une fonction de décharge du CC.
- Donner les deux grandes causes de la sur-pressurisation du CC.
- Définir les expressions suivantes : réduction directe de la pression et réduction indirecte de la pression.
- Expliquer comment la réduction directe de la pression se produit.
- Expliquer comment la réduction indirecte de la pression se produit.
- Décrire les principaux effets des diverses défaillances de procédé : vannes de décharge restées ouvertes, défaillance d'une pompe d'alimentation, vanne de purge de vapeur restée ouverte, défaillance d'une pompe CC principale.

1.3.3 Fonctionnement pendant la mise à l'arrêt du circuit caloporteur

- Expliquer le fonctionnement des deux types de circuits de refroidissement à l'arrêt utilisés dans les réacteurs CANDU, c.-à-d. le circuit indirect et le circuit direct.
- Donner la raison pour laquelle on a recours à une catégorie d'alimentation électrique donnée pour les circuits de refroidissement indirect et direct à l'arrêt.
- Expliquer comment se produit le phénomène de thermosiphon dans un réacteur CANDU.
- Donner quatre conditions requises pour maintenir le thermosiphon.
- Définir l'expression « refroidissement d'urgence ».
- Expliquer quelles sont les contraintes relatives à l'utilisation des circuits de refroidissement à l'arrêt dans le cas des refroidissements d'urgence.

1.3.4 Eau lourde du CC

- Donner deux raisons pour lesquelles l'eau lourde du circuit caloporteur a une limite de la teneur isotopique minimale.
- Expliquer pourquoi une limite supérieure de la teneur isotopique est appliquée à l'eau lourde du circuit caloporteur.
- Énoncer les quatre causes principales de la baisse de la teneur isotopique dans le CC.
- Énoncer les effets immédiats et à long terme d'une baisse soudaine de la teneur isotopique du caloporteur dans le CC.
- Énoncer quatre dangers d'irradiation potentiels associés au D₂O du circuit caloporteur lorsque le réacteur est à l'arrêt.
- Énoncer deux dangers d'irradiation potentiels additionnels dans le D₂O du circuit caloporteur lorsque le réacteur fonctionne.
- Expliquer le rôle principal de chacun des circuits de collecte suivants : circuit de collecte du D₂O du circuit caloporteur (1), circuit de collecte du D₂O (1), circuit de récupération de la vapeur (4), circuit de récupération du D₂O liquide (1).

- Énoncer trois raisons pour lesquelles il y a une limite appliquée à la teneur isotopique et à la pureté du D₂O en ce qui a trait au retour vers le circuit caloporteur.
- Énoncer les conséquences graves possibles des conditions anormales suivantes : taux anormalement élevé de récupération/collecte de D₂O (sur une période de temps donnée) (3), fuite d'un tube de force (1), fuite d'un tube de générateur de vapeur (2).

1.3.5 Auxiliaires du circuit caloporteur

Épuration

- Énoncer trois raisons pour lesquelles la température d'entrée du circuit d'épuration du circuit caloporteur est importante.
- Décrire comment la température d'entrée du circuit d'épuration est maintenue dans le cas des circuits d'épuration qui fonctionnent à des pressions réduites.
- Décrire comment la température d'entrée du circuit d'épuration est maintenue dans le cas des circuits d'épuration qui fonctionnent à la pression CC maximale.
- Donner deux raisons pour lesquelles le débit du circuit d'épuration du circuit caloporteur est important, et décrire comment celui-ci est maintenu.
- Décrire comment le débit d'épuration est maintenu dans le cas des circuits d'épuration qui fonctionnent à des pressions réduites.
- Décrire comment le débit d'épuration est maintenu dans le cas des circuits d'épuration qui fonctionnent à la pression CC maximale.
- Expliquer pourquoi le ΔP entre les résines échangeuses d'ions du circuit d'épuration du circuit caloporteur est important.
- Énoncer trois raisons pour lesquelles la pression d'entrée du circuit d'épuration du circuit caloporteur est importante.
- Décrire deux méthodes d'évitement des pressions excessives.

- Donner deux conditions du circuit caloporteur qui nécessitent une augmentation du taux d'enlèvement des impuretés dans le circuit caloporteur.
- Décrire comment ce taux d'enlèvement accru est obtenu.

Addition d'hydrogène

- Expliquer le rôle de l'addition d'hydrogène dans le circuit caloporteur.
- Expliquer les principales préoccupations associées à la concentration de H₂ dans un CC hors limites.
- Expliquer les conséquences de la sortie de solution du H₂, du D₂ et du O₂.

Approvisionnement de la garniture de pompe

- Énoncer les deux grands rôles du circuit d'alimentation du joint d'étanchéité des pompe.
- Expliquer pourquoi le D₂O fourni pour assurer le joint de la garniture doit être filtré, pressurisé et refroidi.
- Préciser d'où vient l'alimentation de secours pour le joint de la garniture.
- Énoncer quatre paramètres qui sont surveillés afin de vérifier les problèmes de joint.

1.4 Systèmes spéciaux de sûreté

1.4.1 Systèmes d'arrêt d'urgence

- Énoncer les deux conditions anormales génériques au cours desquelles les systèmes d'arrêt d'urgence sont conçus pour protéger les réacteurs CANDU.
- Expliquer la raison d'être d'un système d'arrêt d'urgence.
- Décrire les trois types de systèmes d'arrêt d'urgence des CANDU.
- Expliquer pourquoi les systèmes d'arrêt d'urgence doivent être indépendants les uns des autres et des systèmes de procédé.

- Expliquer pourquoi un système d'arrêt devrait être à sûreté intégrée.
- Expliquer pourquoi un système d'arrêt d'urgence doit être un système à sûreté intégrée.
- Expliquer pourquoi des mécanismes de verrouillage de sûreté sont contenus dans le système d'arrêt d'urgence.
- Expliquer la différence entre un arrêt absolu et un arrêt conditionnel.
- Dans les cas suivants, expliquer pourquoi le paramètre d'arrêt absolu est souvent requis pour protéger la tranche : perte de régulation, perte de source froide primaire.
- Expliquer l'importance des paramètres redondants pour actionner le système d'arrêt d'urgence.
- Donner deux raisons pour lesquelles on doit actionner manuellement le SAU#1 et le SAU#2.

1.4.2 Refroidissement d'urgence du cœur par injection

- Énoncer le rôle du système de refroidissement d'urgence du cœur (« SRUC ») par injection.
- Préciser ce que l'on entend par APRP (accident dû à la perte de réfrigérant primaire).
- Nommer le paramètre clé qui cause un arrêt du réacteur en cas de petit APRP et de grave APRP.
- Énumérer les paramètres qui doivent être considérés avant de déclencher le SRUC.
- Nommer les autres systèmes de sûreté qui doivent être activés suite à un APRP.
- Expliquer les trois phases opérationnelles du SRUC.
- Donner les trois raisons pour lesquelles le SRUC déclenche un refroidissement d'urgence.
- Donner deux raisons pour lesquelles les pompes du CC devraient fonctionner le plus longtemps possible après un APRP.

- Décrire la séquence des opérations des principaux composants et leur rôle dans le fonctionnement du SRUC.
- Définir les termes associés à l'état opérationnel du SRUC : à l'équilibre, bloqué, disponible.
- Nommer les deux grandes conséquences ou préoccupations associées à l'incapacité de bloquer le SRUC avant la dépressurisation du circuit caloporteur.
- Préciser l'état du réacteur requis lorsque le SRUC est bloqué.
- Donner deux raisons justifiant le déclenchement automatique du SRUC.

1.4.3 Confinement

- Préciser les deux types de systèmes de confinement utilisés dans les réacteurs CANDU ainsi que le système à l'équilibre commun aux deux types de systèmes.
- Expliquer comment la pression subatmosphérique est habituellement maintenue pour un système de confinement à suppression de pression.
- Préciser deux fonctions qui doivent être assurées par l'inventaire d'eau totale dans le confinement en cas d'APRP.
- Décrire les fonctions d'un système de confinement à suppression de pression (CSP) et la manière dont l'aspersion est déclenchée.
- Décrire la fonction des refroidisseurs de voûtes.
- Décrire l'étanchéité du confinement.
- Décrire le fonctionnement des systèmes de confinement.
- Préciser le rôle des sas pour les deux types de systèmes de confinement.
- Expliquer le rôle du système de décharge d'air filtré (SDAF).
- Expliquer le rôle des allumeurs d'hydrogène.
- Préciser comment la pression est habituellement maintenue en deçà de la pression atmosphérique dans le confinement.

- Expliquer les exigences relatives à la disponibilité du confinement.

1.5 Circuits du réacteur

1.5.1 Circuit du gaz annulaire

- Nommer les trois grands avantages de l'utilisation du CO₂ comme gaz annulaire.
- Dire pourquoi le circuit du gaz annulaire doit être en circulation pour remplir son rôle.
- Expliquer pourquoi les paramètres du gaz annulaire sont surveillés et donner la plage des valeurs de fonctionnement normal : pression et point de rosée.
- Donner six raisons pour lesquelles la purge du circuit du gaz annulaire est requise.
- Pour des conditions anormales données, mentionner le nombre de préoccupations importantes en cause.
- Préciser à quel moment le circuit du gaz annulaire peut être stagnant.

1.5.2 Circuits de refroidissement des boucliers d'extrémité

- Donner la raison pour laquelle on doit refroidir les boucliers d'extrémité.
- Expliquer les conséquences de la perte de refroidissement du bouclier d'extrémité.
- Préciser le pourcentage approximatif de puissance thermique du réacteur éliminée par le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité.
- Décrire le trajet d'évacuation de la chaleur du circuit de refroidissement des boucliers.
- Expliquer pourquoi la boucle d'épuration du circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité est requise.
- Expliquer trois paramètres autres que la variable contrôlée (température) qui doivent être surveillés afin de s'assurer que la performance du circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité est adéquate.

- Nommer trois actions requises en cas de perte de refroidissement des boucliers d'extrémité.
- Expliquer trois conditions qui doivent être respectées pour permettre l'arrêt temporaire du circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité.
- Expliquer les trois précautions spéciales à prendre lorsque le bouclier d'extrémité doit être drainé.
- Donner la raison pour laquelle le bouclier biologique/thermique doit être refroidi.
- Expliquer les conséquences de la perte de débit de refroidissement du bouclier biologique/thermique.
- Donner le pourcentage approximatif de la puissance thermique du réacteur éliminée par le circuit de refroidissement du bouclier biologique.

1.6 Combustible

1.6.1 Comportement du combustible

- Énumérer sept facteurs qui contribuent à la présence de combustible défectueux pendant le fonctionnement du réacteur.
- Énumérer les méthodes pouvant être utilisées pour réduire chacun de ces facteurs.
- Nommer deux facteurs qui peuvent causer des températures élevées du combustible.
- Décrire les effets du remplacement de combustible à forte combustion par du combustible neuf sur la forme du flux lorsque le réacteur est en régime de puissance.
- Expliquer comment le chargement de combustible à l'arrêt risque de provoquer une répartition du flux spatial inacceptable au redémarrage.
- Définir l'expression « forme du flux de référence ».
- Expliquer pourquoi la forme du flux dans un réacteur CANDU en exploitation diffère de la forme de référence.

- Définir les termes suivants qui s'appliquent à un réacteur CANDU en exploitation : variations dues au chargement de combustible, facteur de pointe de la puissance de canal (FPPC).
- Dire pourquoi la puissance brute est limitée lorsque le réacteur est exploité alors que les barres de compensation sont retirées du cœur.
- Dire comment le réacteur est protégé contre une puissance élevée excessive lorsqu'il est exploité sans que la forme du flux soit analysée.
- Expliquer la raison pour laquelle une limite est appliquée à la puissance pouvant être extraite d'une grappe ou d'un canal de combustible, et la conséquence du dépassement de ces limites.
- Préciser quelle est l'information habituellement disponible pour l'opérateur afin d'assurer que la limite de puissance de grappe n'est pas dépassée dans aucune grappe.
- Donner trois raisons justifiant la détection, la détermination de l'emplacement et l'enlèvement du combustible défectueux du réacteur.
- Expliquer quelles sont les techniques générales utilisées pour détecter et déterminer l'emplacement du combustible défectueux.
- Nommer trois méthodes pouvant être utilisées dans le but de réduire les concentrations d'iode dans le caloporteur, en supposant que la concentration augmente juste en deçà des limites d'action pour les niveaux de mise à l'arrêt.
- Expliquer pourquoi des concentrations d'iode élevées peuvent survenir dans un réacteur à l'arrêt même lorsque le processus de mise à l'arrêt n'a pas causé de défaillance du combustible.

1.6.2 Manutention du combustible

- Expliquer quels sont les facteurs utilisés pour déterminer si un canal peut être chargé : taux de combustion dans le canal, gain de réactivité, conditions anormales dans les canaux, combustible défectueux dans le cœur, proximité de canaux chargés récemment, conditions d'exploitation anormales et niveaux de zone liquide.

- Donner trois raisons pour lesquelles on vise un état particulier du réacteur pendant le rechargement de combustible.
- Nommer trois méthodes qui sont utilisées dans les réacteurs CANDU pour détecter le blocage du flux lorsqu'il y a rechargement de combustible.
- Nommer trois grandes préoccupations se rapportant à la manutention de combustible irradié.
- Dire quelle est la précaution additionnelle prise lorsque l'on manipule du combustible défectueux.
- Donner trois raisons pour lesquelles on doit surveiller quatre paramètres de l'eau contenue dans la travée de stockage du combustible irradié.
- Nommer le paramètre surveillé dans l'atmosphère de la travée de stockage du combustible irradié.

2 Modérateur

2.1 Modérateur (eau lourde)

Dans la présente section du cours, nous allons discuter de certaines caractéristiques du modérateur (eau lourde), de la teneur isotopique du modérateur, des préoccupations radiologiques se rapportant au modérateur et de la garantie d'arrêt du réacteur.

2.1.1 Teneur isotopique du modérateur

Calcul de la teneur isotopique

La teneur isotopique de l'eau lourde est la norme pour décrire la concentration d'eau lourde. La teneur isotopique est définie comme étant la masse de D₂O divisée par la masse totale de D₂O et de H₂O dans un échantillon donné. Par exemple, si dans un échantillon de 20 g, nous avons 19,6 g de D₂O et 0,4 g de H₂O, la teneur isotopique sera calculée comme suit :

$$\frac{19,60}{19,60 + 0,40} \times 100 = \frac{19,60}{20} \times 100 = 98 \%$$

Plage acceptable

Pour que le modérateur puisse remplir sa fonction principale qui est de ralentir les neutrons (rapides) efficacement, avec un minimum d'absorption, la teneur isotopique du modérateur doit être élevée, c'est-à-dire que le modérateur doit être efficace. La plage minimale acceptable est de $\geq 99,8 \%$. La teneur isotopique du modérateur dans cette plage permettra d'obtenir une réactivité suffisante pour que la combustion soit raisonnable. La teneur isotopique a une incidence importante sur la réactivité et, par conséquent, sur les coûts en combustible. Lorsque la teneur isotopique est élevée, cela signifie que le nombre de neutrons parasites absorbés est faible (voir tableau 2.1 pour une tranche de 540 MWe).

Tableau 2.1	
Changement dans la teneur isotopique du D ₂ O	+/- 0,1 %
Δk changement	+/- 3,6 mk

Lorsque la teneur isotopique est élevée, le taux de chargement de combustible doit être plus faible. Plus le taux de chargement de combustible est faible, plus la combustion est élevée, c'est-à-dire $MWh_{(th)}$ produit par kg d'uranium. Dans la plupart des centrales à plusieurs tranches, on dispose de mécanismes d'augmentation de la teneur isotopique de manière à ce que la teneur isotopique soit maintenue de manière constante. Habituellement, la teneur isotopique du modérateur dans ces centrales est d'environ 99,9 %.

Limite de la teneur isotopique

Si la teneur isotopique du modérateur est trop faible, la réactivité globale du cœur le sera également. Supposons que la teneur isotopique du modérateur est passée de 99,80 % à 99,45 %. Dans le tableau 2.1, le changement de réactivité du cœur serait de 12,6 mk. Il s'agit d'une quantité énorme de réactivité, qui ne peut pas être compensée par les niveaux de zone. Une pénalité économique s'ensuivra pour maintenir le réacteur critique. Pour compenser ce changement important de réactivité et pour maintenir le réacteur critique, il existe deux méthodes : le retrait des barres de compensation et l'augmentation du chargement de combustible.

Retrait des barres de compensation (s'il y a lieu)

Durant le fonctionnement normal, les barres de compensation sont entièrement insérées dans le cœur. L'enlèvement de ces absorbeurs de neutrons hors du cœur donnera lieu à une augmentation de la réactivité du cœur (mais cela nécessitera probablement un décroissement de puissance pour que la forme du flux se situe près des formes analysées).

Chargement de combustible accru

Le chargement de combustible additionnel dans le cœur permettra d'augmenter la réactivité du cœur. Il s'ensuivra cependant une pénalité de combustion, étant donné que le combustible est retiré avant sa combustion complète.

Le principal indicateur informant l'opérateur d'une réduction importante de la teneur isotopique du modérateur est la baisse du niveau de zone moyen qui compense la perte de réactivité. Lorsque les zones atteignent leur limite inférieure, il faut retirer les barres de compensation. Dans toutes les centrales construites après Pickering-A, on trouve des mesures de protection automatique qui sont initiées lorsque survient une surpuissance régionale.

La baisse lente ou chronique de la teneur isotopique est habituellement détectée grâce aux analyses de laboratoire courantes.

Il n'existe aucune limite supérieure de la teneur isotopique du modérateur en ce qui a trait au fonctionnement du réacteur. La teneur isotopique peut être augmentée par un apport de modérateur (D_2O) à teneur isotopique plus élevée en provenance du dispositif d'augmentation de la teneur isotopique du modérateur.

Baisse de la teneur isotopique

La baisse de la teneur isotopique pendant le fonctionnement normal peut se produire suite à une addition accidentelle de H_2O ou de D_2O dont la teneur isotopique est inférieure à celle du système. La défaillance de l'équipement comme les échangeurs de chaleur du modérateur, le refroidissement des boucliers d'extrémité ou des fuites dans la zone liquide peuvent également contribuer à faire baisser la teneur isotopique. De la vapeur d'eau peut également pénétrer par les tubulures de retour du réservoir du circuit de collecte du D_2O . Les effets de la baisse de la teneur isotopique sur le fonctionnement normal du réacteur à pleine puissance sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 2.2

Effets de la baisse de la teneur isotopique du modérateur (D_2O)

Changement dans la teneur isotopique du modérateur par rapport à la valeur de référence (99,8 %)	Effet à court terme	Effet à long terme
Lente augmentation de la teneur isotopique à cause d'un apport de modérateur à forte teneur isotopique	Aucun effet observable, changement de la teneur isotopique trop faible	Légère diminution du taux de chargement de combustible. Combustion moyenne plus élevée.
Baisse de la teneur isotopique inférieure ou égale à 0,3 %	L'exploitation se poursuit avec une baisse du niveau de zone liquide moyen	Taux de chargement de combustible plus élevé pour ramener (et maintenir) les

	(les barres de compensation doivent être retirées)	niveaux de zone et les barres de compensation à leur position d'exploitation normale. Combustion moyenne moins élevée.
Baisse de la teneur isotopique marquée et supérieure à 0,3 %	Mise à l'arrêt, si Δk des zones/barres de compensation est inadéquat pour maintenir la criticité.	Longue mise à l'arrêt jusqu'à ce que du D ₂ O neuf ou à plus forte teneur isotopique soit fourni.

2.1.2 Préoccupations radiologiques relatives au modérateur

La conception du circuit du modérateur a permis de réduire les préoccupations radiologiques de différentes manières.

L'équipement du circuit du modérateur, comme les pompes, les échangeurs de chaleur et les conduites se trouvent dans les zones blindées à accès contrôlé, principalement en raison de la présence de champs de rayonnement gamma élevé émis par le N¹⁶ et O¹⁹. Les zones à accès contrôlé ne sont pas accessibles lorsque le réacteur est exploité à une puissance normale en raison des dangers d'irradiation. Les conduites sont conçues pour minimiser les fuites potentielles des sources et pour éliminer l'accumulation de matières radioactives dans les conduites et les crépines. Tous les matériaux utilisés pour l'équipement sont à faible teneur en cobalt.

Deux préoccupations radiologiques majeures associées au circuit du modérateur seront examinées de façon plus approfondie : le rayonnement gamma émis par le N¹⁶ et le O¹⁹ et le rayonnement bêta émis par le H₁³

La figure 2.1 illustre l'accumulation de rayonnement gamma émis par le N¹⁶ et le O¹⁹ en régime de puissance. Pendant l'exploitation, les champs de rayonnement élevé atteignent un sommet d'environ 10 R/h. Après la mise à l'arrêt, les produits de filiation radioactifs à courte période se désintègrent environ une minute après la mise à l'arrêt.

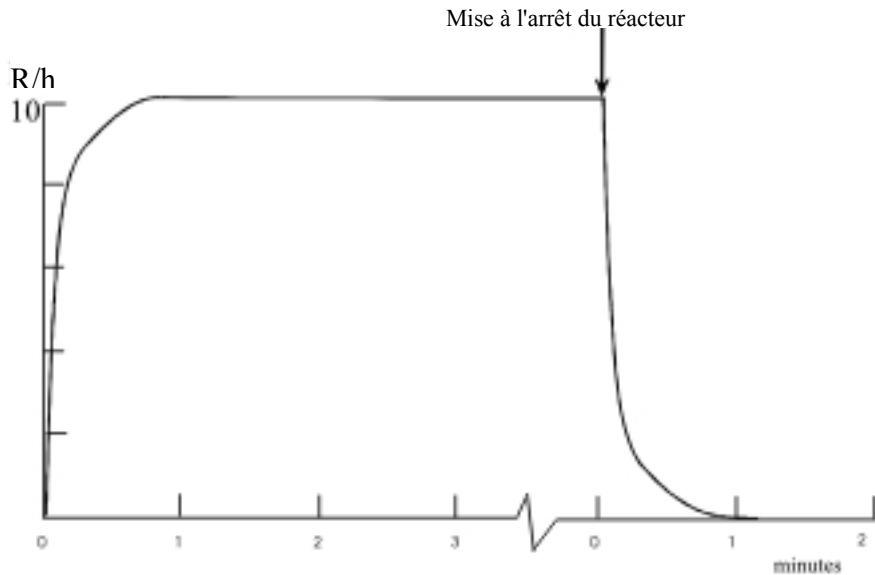


Figure 2.1
Champs de rayonnement gamma émis par le N^{16} et le O^{19}

L'accumulation de tritium (Ci/kg) dans le modérateur constitue également une préoccupation sur le plan radiologique. Le tritium s'accumule plus rapidement dans le modérateur que dans le circuit caloporteur, et les trois principales raisons expliquant ce phénomène sont indiquées ci-après.

1. Le flux de neutrons thermiques est environ deux fois plus élevé dans le modérateur que dans le circuit caloporteur à l'intérieur du cœur. La raison en est que le modérateur est la source des neutrons thermiques, alors que le combustible est une source froide (le fluide CC à proximité du combustible accuse une dépression du flux pour les neutrons thermiques).
2. La majeure partie du modérateur (D_2O) séjourne plus longtemps dans le cœur que le D_2O du CC. Par conséquent, le modérateur (D_2O) absorbe davantage de neutrons thermiques, ce qui donne lieu à une concentration de tritium plus élevée.
3. Le CC est un circuit plus complexe, comportant un taux de fuite plus élevé que le circuit du modérateur. L'eau d'appoint du CC dilue la concentration de H_1^3 plus que dans le modérateur.

Lorsque le modérateur s'échappe du circuit, la concentration de tritium devient une préoccupation radiologique. En raison de la période du tritium qui est d'environ 12 ans, la concentration s'accumule lentement jusqu'à une valeur d'équilibre. Dans la pratique, cette concentration est réduite pour les raisons suivantes :

- a) panne et exploitation à puissance inférieure à la puissance maximale du réacteur;
- b) apport de D₂O d'appoint à faible concentration de tritium dans le modérateur.

Avant l'existence des programmes de réduction du tritium instaurés par l'installation d'extraction du tritium de Darlington, les concentrations à l'équilibre dans les centrales se situaient environ entre 20 et 40 Ci/kg de D₂O. À l'heure actuelle, les concentrations se situent environ autour de ≈10 Ci/kg de D₂O.

Les trois conditions suivantes sont des dangers associés au fonctionnement du circuit du modérateur.

2.1.3 Modérateur (D₂O) déversé pendant la mise à l'arrêt

Lorsqu'il y a fuite ou déversement de modérateur (D₂O) hors du réacteur pendant la mise à l'arrêt, les dangers d'irradiation primaire suivants existent :

- tritium
- produits d'activation, sous forme d'impuretés ioniques dissoutes ou produits insolubles entraînés.

Lors de la mise à l'arrêt, les isotopes à courte période N¹⁶ et O¹⁹ se désintègrent rapidement. Les photoneutrons contribuent aux champs de rayonnement pendant à peu près la même période.

2.1.4 Modérateur (D₂O) déversé en régime de puissance

Lorsqu'il y a fuite du D₂O hors du réacteur ou qu'il y a déversement pendant le fonctionnement normal du réacteur, les dangers d'irradiation primaire suivants existent :

- rayonnement gamma (N¹⁶, O¹⁹) provenant du cœur et des conduites (pendant quelques secondes)
- tritium
- produits d'activation, sous forme d'impuretés ioniques dissoutes et/ou produits insolubles entraînés

- danger d'irradiation bêta dans le trou du circuit de conduite
- photoneutrons émis par le N^{16} (pendant quelques secondes).

2.1.5 Modérateur (D_2O) contenu dans les conduites en régime de puissance

Les principales préoccupations radiologiques associées au modérateur (D_2O) scellé dans le modérateur en régime de puissance comprennent :

- rayonnement gamma (N^{16} , O^{19});
- rayonnement gamma émis par les produits d'activation - solubles ou insolubles;
- photoneutrons émis par le N^{16} .

Lorsque le réacteur est mis à l'arrêt, le champ de rayonnement émis par le N^{16} et le O^{19} sont essentiellement nuls. Le rayonnement des produits d'activation sera la seule préoccupation primaire.

Tant que le modérateur est contenu dans le circuit, le tritium ne présente aucun danger, car le rayonnement bêta ne peut traverser les conduites. Cependant, dans la pratique, les salles auxiliaires du modérateur accueillent les fuites de tritium vaporisé sous forme d'émission en suspension dans l'air. Des circuits sont en place pour récupérer la vapeur de D_2O sous forme liquide. Cela permet de réduire l'exposition au tritium ainsi que de récupérer le D_2O pour des raisons économiques.

2.1.6 Garantie de mise à l'arrêt du réacteur

Il existe deux moyens d'agir sur le circuit du modérateur pour garantir que le réacteur est à l'arrêt :

Empoisonnement du modérateur

Cette méthode met le réacteur à l'état d'arrêt garanti en raison de l'insertion de réactivité négative très élevée. Habituellement, l'empoisonnement du modérateur correspond à l'insertion de centaines de mk de réactivité négative. Un trajet d'écoulement est suivi dans le modérateur pour s'assurer que : (i) le poison n'est pas éliminé par l'épuration; (ii) le poison n'est pas dilué par de l'eau non empoisonnée; (iii) et le poison n'est pas drainé. Le modérateur (D_2O) doit également circuler de manière continue et être surveillé par échantillonnage afin de déterminer la concentration de poison et le pH habituellement deux fois par quart de travail afin d'assurer l'état d'arrêt garanti. Si le pH n'est pas adéquat, le poison peut sortir de solution.

Drainage du modérateur

Il est impossible pour un réacteur alimenté à l'uranium naturel d'atteindre la criticité sans l'effet modérateur du D₂O dans la calandre. Dans ce cas, on s'assure que la calandre comporte des vannes de drainage et que leur ouverture est garantie. Cela permet d'éviter que le modérateur (D₂O) s'accumule par inadvertance dans la calandre. La centrale Pickering-A utilise un réservoir de drainage du modérateur comme système d'arrêt d'urgence.

2.1.7 Notions principales

- La concentration d'eau lourde s'exprime comme un pourcentage en poids du D₂O dans un échantillon donné, appelé teneur isotopique.
- La plage normale de la teneur isotopique est $\geq 99,8$.
- Une limite inférieure pour la teneur isotopique est imposée afin de réduire au minimum la pénalité économique et de s'assurer que le réacteur demeure critique.
- Le niveau de zone moyen diminuera en raison de la faible teneur isotopique.
- La baisse soudaine de la teneur isotopique du modérateur entraînera une baisse du niveau de zone moyen. Des barres de compensation peuvent être insérées dans le cœur selon le niveau de zone moyen et l'erreur de puissance.
- Pendant la mise à l'arrêt, les dangers radiologiques associés au modérateur (D₂O) déversé comprennent le tritium et les produits d'activation.
- Pendant le fonctionnement normal, les dangers radiologiques associés au modérateur (D₂O) déversé comprennent :
 - tritium
 - rayonnement gamma émis par le N¹⁶ et le O¹⁹
 - produits d'activation
 - rayonnement bêta émis en raison de la fuite
 - photoneutrons émis par le N¹⁶ et le D₂O

- Pendant l'exploitation normale, les dangers d'irradiation associés au modérateur dans les conduites comprennent notamment :
 - rayonnement gamma émis par l'azote 16, l'oxygène 19 et les photoneutrons
 - produits d'activation
 - le circuit du modérateur peut garantir l'état d'arrêt du réacteur en empoisonnant le modérateur ou en le drainant hors du coeur.

2.2 Circuit du modérateur

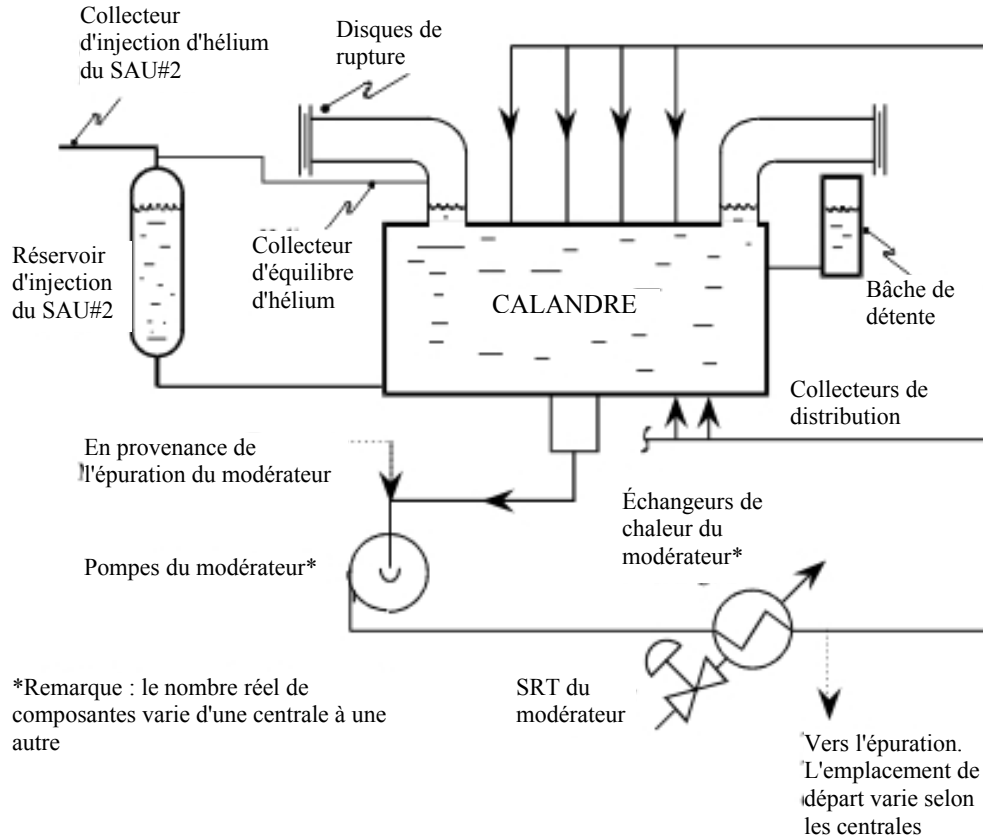


Figure 2.2
Circuit du modérateur de type courant

La présente section du cours examine le circuit du modérateur. Nous allons voir les sources de chaleur, l'évacuation de la chaleur, la température du modérateur, les conséquences des points chauds localisés, le niveau inadéquat du modérateur, la perte de refroidissement du modérateur et les fuites dans les échangeurs de chaleur. Réf. figure 2.2

2.2.1 Production de chaleur

Au cours du processus de modération de la réaction nucléaire, le modérateur est assujéti à une production de chaleur considérable. La chaleur absorbée par le modérateur correspond environ à 5 % de la puissance thermique brute produite.

L'énergie thermique contenue dans le modérateur provient des sources suivantes : thermalisation des neutrons, absorption des rayons gamma et transfert de chaleur classique.

Thermalisation des neutrons

Il s'agit là d'une source de chaleur importante lorsque le réacteur est en régime de puissance. Lorsque les neutrons frappent des noyaux de D_2O , un transfert d'énergie cinétique des neutrons vers le D_2O se produit. Cela augmente l'énergie du D_2O qui se traduit par une élévation de température.

Cette source diminue rapidement lorsque le réacteur est mis à l'arrêt.

Absorption de rayons γ

Une certaine quantité de rayonnements est absorbée par les molécules de D_2O , ce qui augmente leur énergie moléculaire ainsi que la température du modérateur.

L'importance du débit calorifique est plus grande lorsque le réacteur est en régime de puissance; cependant, elle demeure importante pendant une longue période après la mise à l'arrêt.

Transfert de chaleur classique

En dépit de l'utilisation du CO_2 comme gaz annulaire, une certaine quantité de chaleur émane des canaux de combustible vers le modérateur.

La conduction par les raccords d'extrémité, les soufflets, le bouclier d'extrémité et d'autres parties structurales, donne également lieu à un transfert de chaleur du combustible vers le modérateur.

Cette source de chaleur dépend de la différence de température entre le modérateur et les canaux de combustible, et par conséquent, elle demeure constante de la PZC (puissance zéro chaude) jusqu'à la pleine puissance, ou varie légèrement en fonction de la puissance du réacteur selon la centrale.

2.2.2 Évacuation de la chaleur

La chaleur doit être évacuée du modérateur afin d'éviter une élévation de sa température et les conséquences néfastes résultantes qui pourraient survenir et dont nous avons discuté précédemment. Étant donné que le modérateur collecte constamment de la chaleur en raison des sources mentionnées précédemment, sa température augmentera à moins qu'une source froide de capacité égale soit fournie.

Le modérateur circule continuellement à travers un échangeur de chaleur grâce à des pompes qui fournissent la source froide requise. Le côté secondaire de l'échangeur de chaleur est alimenté en eau de service basse pression. Le retour de l'eau lourde (modérateur) vers la calandre est réalisé grâce à divers points d'entrée afin de réduire au minimum la formation de points chauds, d'assurer le refroidissement adéquat de tous les composants, et de favoriser la distribution du poison.

2.2.3 Contrôle de la température du modérateur

La température du modérateur est contrôlée par différents débits d'eau de service qui traversent les échangeurs de chaleur du modérateur. La température à la sortie du modérateur est contrôlée de manière à être de 61 °C. La température de sortie fait partie des *Lignes de conduite pour l'exploitation*. Il faut éviter de dépasser la température de sortie du modérateur pour les raisons suivantes : atténuation des accidents, effets de la réactivité, danger d'explosion, considérations métallurgiques.

Atténuation des accidents

Le modérateur agit parfois comme source froide du combustible en cas d'APRP combiné avec une défaillance simultanée du SRUC. Dans ce cas, le vidage du canal de combustible causera une surchauffe du canal. De plus, si le refroidissement du combustible n'est pas assuré, les canaux de combustible s'affaîsseront et entreront éventuellement en contact avec les tubes de calandre. Lorsque ce contact se produit, la chaleur se propage du canal de combustible et du tube de calandre vers le modérateur (D₂O), ce qui aide à maintenir l'intégrité des tubes de force. À mesure que la température du modérateur augmente, sa capacité à agir comme source froide diminue.

Considérations neutroniques

Le contrôle de la température de sortie du modérateur à 61 °C ne signifie pas qu'il s'agisse là de la température la plus élevée dans le modérateur. La température globale du modérateur dans la calandre est supérieure d'environ 3 °C à la température de sortie. Les températures à l'intérieur de la calandre varient selon l'emplacement et les activités opérationnelles (p. ex. chargement de combustible).

- À mesure que la température du modérateur augmente, le coefficient de température du modérateur (positif pour le combustible à l'équilibre) entraîne une augmentation de la réactivité du cœur.
- Si la température diminue jusqu'au point d'ébullition localisé, le vidage diminue le pas du réseau du cœur efficace (c.-à-d. qu'aucune modération ne se produit dans les bulles de vapeur). Étant donné que nos réacteurs sont surmodérés, cela peut entraîner une augmentation de la réactivité du cœur jusqu'à ce que l'ébullition devienne excessive, ce qui causera alors une sous-modération.
- L'ébullition serait initialement localisée aux points chauds et serait très erratique. Cela pourrait causer des effets de réactivité instables dans le cœur, localisés aux emplacements d'ébullition.

Danger d'explosion

Une température du modérateur plus élevée fait augmenter les niveaux du gaz de couverture du modérateur (D_2), car le D_2 sort de solution. Cela peut entraîner un danger d'explosion dans le gaz de couverture du modérateur.

Considérations métallurgiques

La plage de température thermique dans le modérateur doit être déterminée afin de réduire au minimum les contraintes thermiques entre le bouclier d'extrémité et la calandre. Les dommages causés aux composants (comme les joints dudgeonnés, les soudures, etc.) si les contraintes deviennent trop grandes.

2.2.4 Niveau du modérateur

Pour que le modérateur puisse jouer son rôle, le niveau du modérateur doit être suffisant pour réduire au minimum les suites de neutrons hors du cœur et pour refroidir les composants du cœur.

- Si le niveau du modérateur est trop faible, il y aura perte de réactivité, surchauffe des composants du cœur et taux d'évolution élevé de D_2 en raison de la zone superficielle de D_2O accru qui sera exposée au gaz de couverture.
- Dans certaines centrales, la réponse de la chambre d'ionisation peut être affectée et des inclinaisons du flux grave peuvent résulter si la puissance est maintenue à des niveaux réduits.
- Si le niveau du modérateur est trop élevé, il n'y aura pas suffisamment d'espace dans la calandre pour gérer un incendie dans le SAU#2 sans faire éclater un disque de rupture. L'inondation possible du collecteur d'injection de He du SAU#2 peut se produire, ce qui pourrait causer un coup de bélier important en cas d'incendie dans le SAU#2.

Tous les réacteurs CANDU, à l'exception de Pickering-A, ne disposent pas d'une plage importante de changement de niveau du modérateur avant qu'un paramètre de déclenchement d'un système de sûreté soit atteint. Cependant, à Pickering-A, le contrôle du niveau du modérateur peut permettre de contrôler la réactivité.

2.2.5 Conditions anormales

Dans cette section, nous allons voir deux conditions anormales : la perte de refroidissement du modérateur et la fuite des échangeurs de chaleur du modérateur.

Perte de refroidissement

La perte de refroidissement du modérateur entraînera une augmentation de la température du modérateur. Cela pourrait être causé par une perte du débit de circulation du modérateur ou par la perte d'eau de refroidissement vers les échangeurs de chaleur du modérateur. Cela entraînera les conséquences mentionnées précédemment dans la section contrôle de la température et du niveau du modérateur.

Fuite des échangeurs de chaleur du modérateur

Dans le cas de la fuite d'un échangeur de chaleur du modérateur, le modérateur (D_2O) sera évacué dans le lac. Cela entraîne deux problèmes opérationnels :

- a) il risque d'y avoir du D_2O fortement tritié dans l'environnement. L'exploitation continue peut dépendre de

la cible de 1 % de la LOD (limite opérationnelle dérivée) de la centrale.

- b) une pénalité économique est imposée en cas de perte de D_2O hors de la centrale. L'exploitation continue dépendra également du taux de fuite. Si la fuite est suffisamment grave pour nécessiter une réparation immédiate, une mise à l'arrêt sera requise pour drainer et réparer les tubes qui ont fui ou pour remplacer la grappe de tubes de l'échangeur de chaleur.

2.2.6 *Notions principales*

- Les principales sources de chaleur dans le modérateur en opération sont la thermalisation des neutrons, l'absorption de rayons γ (émis par la fission, les produits de fission et les composants du cœur rendus radioactifs) et les mécanismes de transfert de chaleur classiques. La principale source de chaleur dans le modérateur lorsque le réacteur est à l'arrêt provient des produits de fission et des composants du cœur rendus radioactifs ainsi que des transferts de chaleur classiques.
- La température optimale du modérateur (D_2O) est de 61 °C à la sortie.
- Si la température du modérateur est trop basse ou trop élevée, les contraintes thermiques entre le bouclier d'extrémité et la calandre seront élevées, ce qui risque de causer des dommages à l'équipement.
- Si la température du modérateur est trop élevée, la réactivité augmentera. Des températures très élevées peuvent causer une ébullition localisée. Cela entraînerait des problèmes de contrôle de la réactivité. Lorsque la température est élevée, le modérateur n'est pas aussi efficace comme source froide en cas d'APRP (s'il y a affaissement des canaux en raison d'une surchauffe, jusqu'à ce qu'un contact avec les tubes de calandre soit fait). Des excursions de D_2 peuvent également se produire en raison de la température élevée du modérateur.
- Le niveau normal du modérateur doit être suffisamment élevé pour réduire au minimum la fuite de neutrons et pour assurer que les composants du cœur sont refroidis.

- Si le niveau du modérateur est trop faible, cela donne lieu à une perte de réactivité, une surchauffe des composants du cœur et un taux d'évolution du D_2 accru en raison de la zone de surface du D_2O plus grande exposée au gaz de couverture. Dans certaines centrales, la réponse de la chambre d'ionisation peut être touchée.
- Si le niveau du modérateur est trop élevé, il n'y aura pas suffisamment d'espace dans la calandre pour gérer un incendie dans le SAU#2 sans faire éclater un disque de rupture. L'inondation possible du collecteur d'injection de He du SAU#2 peut se produire, ce qui pourrait causer un coup de bélier important en cas d'incendie dans le SAU#2.
- La perte d'eau de service vers les échangeurs de chaleur du modérateur ou la perte de débit de circulation du modérateur fera augmenter la température du modérateur. Le réchauffement résultant du modérateur risque d'entraîner des problèmes de contrôle de la réactivité, une surchauffe de l'équipement et des dommages à l'équipement. En outre, dans ce cas, le modérateur ne sera pas aussi efficace comme source froide en cas d'APRP grave. Lorsque l'ébullition se produit, la pression pourrait également augmenter dans la calandre, ce qui causerait l'éclatement d'un disque de rupture. Des excursions de D_2 et une augmentation du niveau du modérateur peuvent se produire en raison de la perte de refroidissement du modérateur.
- Une fuite d'un échangeur de chaleur du modérateur pourrait causer la perte d'un modérateur (D_2O). Cela constitue une préoccupation relative aux émissions de matière radioactive et une pénalité économique.

2.3 *Circulation du gaz de couverture et contrôle de la pression*

Le rôle du circuit du gaz de couverture du modérateur est de créer une atmosphère non corrosive/non explosive pour les composants de la calandre. C'est pour ces raisons que l'hélium est utilisé comme gaz de couverture du modérateur.

Cette section portera sur les exigences relatives à la circulation du gaz de couverture, sur la purge du gaz de couverture, sur les facteurs ayant une incidence sur les concentrations de D_2 (gaz de couverture) et sur

les conséquences de concentrations élevées de D_2 et de N_2 dans le gaz de couverture.

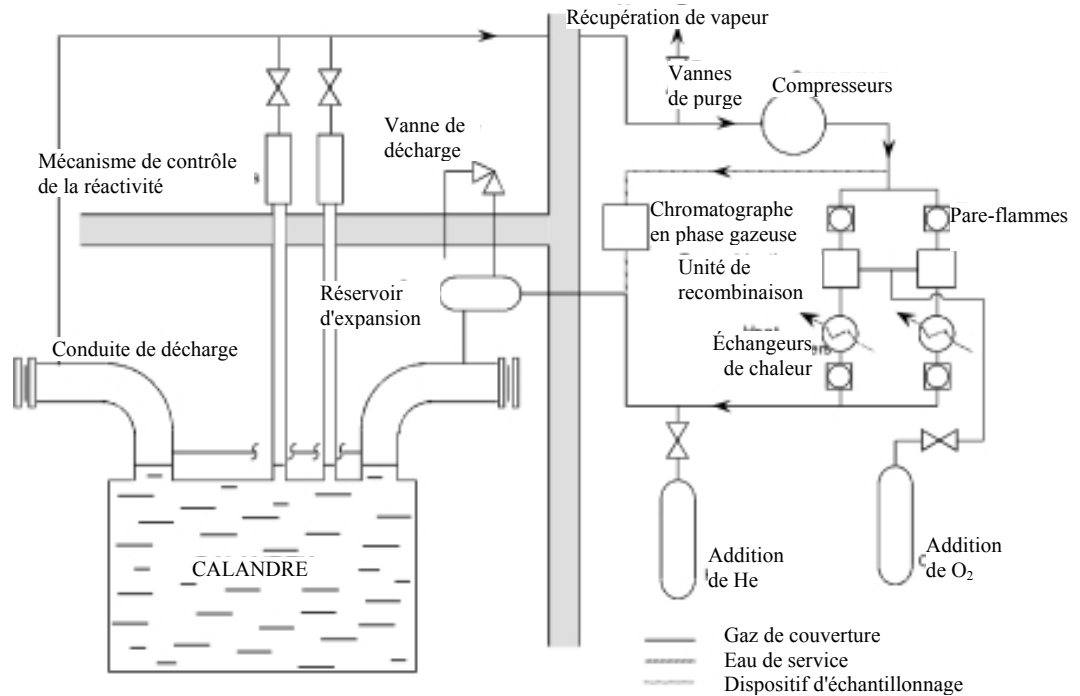


Figure 2.3
Circuit du gaz de couverture du modérateur simplifié

2.3.1 Limites d'explosion

Le circuit du gaz de couverture facilite la recombinaison de D_2 et de O_2 qui sont générés suite à la radiolyse du modérateur D_2O . Le danger d'explosion est éliminé lorsque l'on maintient les niveaux de D_2 et de O_2 à l'intérieur de la plage de fonctionnement, qui se situe à l'intérieur des limites d'explosion inférieures de 8 % pour le D_2 et de 5 % pour le O_2 . Les niveaux de fonctionnement normaux courants sont habituellement maintenus bien en deçà de 1 % pour le D_2 , alors que les concentrations de O_2 sont légèrement supérieures afin d'assurer une quantité suffisante de O_2 pour la recombinaison.

2.3.2 Concentrations de D_2 et de O_2 dans le gaz de couverture

Le taux de radiolyse et le taux auxquels les gaz dissous s'échappent du modérateur sont affectés par un certain nombre de facteurs.

Le taux de radiolyse augmente lorsque le rayonnement γ est plus important. Ainsi, plus le niveau de puissance est élevé, plus la radiolyse est importante. La conductivité élevée ou la présence d'impuretés (c.-à-d. acide nitrique, fines de résines, huiles, etc.) dans le modérateur feront diminuer le taux naturel de recombinaison aqueuse de D_2 et de O_2 .

Une fois que les gaz sont produits, le taux de sortie de solution dépend également d'un certain nombre d'autres facteurs, comme la température du modérateur, la pression et le niveau/la surface du modérateur, ainsi que la concentration de D_2 et de O_2 dissous dans le modérateur.

2.3.3 Circulation du gaz de couverture

Tous les états de fonctionnement du réacteur nécessitent la circulation du gaz de couverture. Les raisons de cette circulation continue sont les suivantes :

- a) il y a une désintégration de champs γ élevée dans le cœur durant la mise à l'arrêt, ce qui fait en sorte que la radiolyse se poursuit (entraînant l'accumulation des concentrations de D_2 et de O_2). La situation peut être aggravée par les poisons du modérateur (impuretés) qui causent une diminution du taux de recombinaison naturelle. C'est pourquoi les concentrations de D_2 dans le gaz de couverture augmentent lors du redémarrage d'un réacteur, après une panne (c.-à-d. que la radiolyse dépasse le faible taux de recombinaison naturelle).
- b) la circulation continue permet également d'assurer que tout échantillon prélevé dans le gaz de couverture est représentatif de ce dernier.
- c) la circulation permet également d'assurer qu'un écoulement est maintenu vers les unités de recombinaison, qui recombinent le D_2 et le O_2 afin de former du D_2O .

2.3.4 Purge du gaz de couverture

Si, durant une mise à l'arrêt, les compresseurs du gaz de couverture doivent être entretenus, on doit pouvoir recourir à une alimentation en hélium d'appoint et à une méthode de purge. Cela permet de s'assurer que l'élimination du D_2 et du O_2 puisse se faire (p. ex. sans circulation du gaz de couverture dans les unités de recombinaison).

La purge du gaz de couverture est également la seule méthode d'élimination de l'air ou du N_2 contenu dans le gaz de couverture. Cela

est particulièrement important lorsque le système a été ouvert pour l'entretien, c'est-à-dire lorsqu'il y a eu entrée d'air.

La purge du gaz de couverture est réalisée pendant le fonctionnement du réacteur lorsque les concentrations de N_2 ou de D_2 dépassent les limites précisées dans les documents d'exploitation. Il s'agit de purger complètement l'hélium hors du circuit, tout en assurant un apport d'hélium au circuit au même taux (afin d'éviter une diminution de la pression du gaz de couverture).

Au moment de la purge du gaz de couverture, on doit prendre soin de s'assurer que la pression ne diminue pas (p. ex. la pression normale doit être maintenue à environ 10^{-25} kPa(manométrique)). Il convient de rappeler que le fait de baisser la pression dans le circuit du gaz de couverture peut entraîner une diminution de la concentration de D_2 dans le gaz de couverture (et l'évolution des gaz dissous en général).

2.3.5 Surveillance du gaz de couverture

Le gaz de couverture peut être surveillé par deux méthodes :

- a) la première est l'utilisation d'un chromatographe en phase gazeuse en ligne, qui prélève des échantillons en amont et en aval des unités de recombinaison. Cela permet à l'opérateur de savoir si les concentrations de D_2 , de O_2 et de N_2 dépassent les limites prescrites. Les lectures de D_2 et de O_2 de part et d'autre des unités de recombinaison indiqueront également à l'opérateur si ces unités fonctionnent correctement.
- b) l'autre méthode d'échantillonnage consiste à prélever manuellement un échantillon du gaz de couverture. Cet échantillonnage manuel nécessitera une analyse subséquente par un laboratoire d'analyse chimique.

2.3.6 Conditions anormales

La concentration de D_2 , lorsqu'elle se situe entre 2 % et 4 % dans le gaz de couverture, doit demeurer dans cette plage et pour ce faire, des conditions doivent être respectées pour s'assurer que les niveaux de D_2 ne s'élèvent pas davantage. Cela permet d'éviter la présence d'un mélange explosif de D_2 et de O_2 . Les méthodes varient d'une centrale à une autre, mais comprennent habituellement les éléments suivants :

- purge du gaz de couverture;
- addition de O_2 pour s'assurer que la quantité est suffisante en vue de la recombinaison;

- vérification du fonctionnement du compresseur du gaz de couverture et installation d'un autre compresseur, au besoin;
- vérification du fonctionnement des unités de recombinaison. On peut faire cette vérification en s'assurant que la température des unités de recombinaison se situent dans la plage acceptable, c.-à-d. que la recombinaison du D_2 et du O_2 produit de la chaleur. Si le catalyseur de l'unité de recombinaison devient humide, l'unité ne fonctionnera pas (ce qui exigerait que des réchauffeurs soient mis en service jusqu'à ce que l'unité fonctionne de nouveau). Cela pourrait être observé également par les niveaux de D_2 et de O_2 à l'entrée/à la sortie des unités de recombinaison. Si une unité est défectueuse, il faut en mettre une autre en place;
- baisse de la température du modérateur;
- augmentation du niveau du modérateur;
- augmentation de l'épuration ou installation de nouvelles résines échangeuses d'ions;
- maintien de la puissance du réacteur (ne pas l'accroître).

Lorsque la concentration de D_2 atteint 4 % dans le gaz de couverture, les mesures à prendre consistent notamment à s'assurer que la concentration n'atteint pas les limites d'explosion. Ainsi, les mesures à suivre seront un peu plus draconiennes, étant donné que la marge des limites d'explosion du D_2 et du O_2 est réduite. Les méthodes les plus couramment utilisées pour réduire les niveaux de D_2 comprennent notamment :

- la purge continue du gaz de couverture;
- l'échantillonnage effectué au moment où l'on confirme que la concentration de D_2 est supérieure à 4 %, ou juste après, et la mise à l'arrêt de l'unité de manière contrôlée.

La présence d'azote dans le gaz de couverture peut former de l'acide nitrique en présence d'humidité et de rayonnement. Cet acide augmente également la radiolyse dans le modérateur (D_2O). Cela peut entraîner une excursion du D_2 , ce qui pourrait donner lieu à un arrêt de la centrale. À noter que cet acide cause également de la corrosion dans les composants du circuit du modérateur. La concentration de N_2 est

maintenue à [2 %, et les méthodes les plus courantes pour réduire les niveaux de N_2 comprennent notamment :

- purge du circuit du gaz de couverture jusqu'à ce que la concentration de N_2 se situe à l'intérieur des limites spécifiées;
- augmentation de l'épuration du modérateur afin d'éliminer les acides qui se sont formés.

2.3.7 *Notions principales*

- La concentration de D_2 dans le gaz de couverture augmente en fonction de :
 - la température du modérateur. À mesure que la température du modérateur augmente, la solubilité du D_2 diminue.
 - la diminution de la pression du gaz de couverture du modérateur. À mesure que la pression du gaz de couverture diminue, la solubilité du D_2 diminue.
 - la diminution du niveau du modérateur. À mesure que le niveau du modérateur diminue, la surface de contact du modérateur exposé au gaz de couverture augmente. Cette augmentation de la surface de contact rend plus facile la sortie de solution du D_2 gazeux.
 - la diminution de la puissance du réacteur. À mesure que la puissance du réacteur augmente, les champs γ et les champs de neutrons augmentent. Cette augmentation des champs accroît la radiolyse.
 - la présence accrue d'impuretés dans le modérateur. Un niveau d'impureté accru dans le modérateur entraînera une diminution du taux de recombinaison par radiolyse.
 - la concentration de D_2 du modérateur. À mesure que la concentration de D_2 du modérateur augmente, le D_2 atteint un nouvel équilibre avec le gaz de couverture, ce qui donne lieu à un taux d'évolution des gaz plus élevé du modérateur vers le gaz de couverture.
- Les limites d'explosion inférieures pour le D_2 et le O_2 dans un milieu d'hélium sont de 8 % pour le D_2 et de 5 % pour le O_2 .

- Tous les états de fonctionnement du réacteur exigent une circulation du gaz de couverture. La radiolyse se poursuit pendant la mise à l'arrêt du réacteur en raison de la présence de champs élevés de désintégration γ dans le coeur.
- La purge du gaz de couverture est requise lorsque :
 - les concentrations de N_2 ou de D_2 dans le gaz de couverture sont élevées.
 - le circuit a été ouvert sur l'entretien. L'entretien vise à purger l'air (qui est principalement constitué de N_2) hors du gaz de couverture afin d'éviter que de l'acide nitrique ne se forme.
 - les compresseurs du gaz de couverture ne sont pas disponibles pour faire circuler les gaz de couverture à travers les unités de recombinaison.
- Au moment de la purge du circuit du gaz de couverture, on doit prendre soin de s'assurer que la pression du circuit n'est pas abaissée, ce qui pourrait causer une excursion du D_2 .
- Les concentrations de D_2 , de O_2 et de N_2 sont surveillées en direct par le chromatographe en phase gazeuse. On peut également prélever des échantillons en vue d'une analyse effectuée par un laboratoire d'analyse chimique.
- Les concentrations de D_2 entre 2 % et 4 % nécessitent habituellement les étapes suivantes afin de réduire les concentrations :
 - purge du gaz de couverture
 - addition de O_2 pour s'assurer qu'il est en quantité suffisante pour la recombinaison
 - vérification et installation d'une autre unité de recombinaison, au besoin
 - vérification et installation d'un autre compresseur de gaz de couverture, au besoin
 - augmentation du niveau du modérateur

- baisse de la température du modérateur
- maintien de la puissance du réacteur constante.
- Lorsqu'il y a confirmation que les concentrations de D_2 dépassent 4 %, il faut effectuer une mise à l'arrêt (pendant que la purge se poursuit).
- Les concentrations de N_2 dépassant 2 % exigent une purge du gaz de couverture et peuvent nécessiter un taux plus élevé d'épuration du modérateur afin d'éliminer l'acide nitrique qui s'est formé.

2.4 Circuit du poison liquide du modérateur

Le circuit du poison liquide du modérateur sert à contrôler la réactivité. Les poisons neutroniques solubles, qui possèdent une section efficace de capture neutronique élevée afin d'absorber les neutrons, sont ajoutés au modérateur de manière contrôlée.

On peut ajouter du poison pour les raisons suivantes :

- a) Simulation de la combustion du combustible neuf. Le poison compense l'excès de réactivité dû au combustible pendant les 200 premiers jours pleine puissance de fonctionnement par addition d'une valeur de réactivité négative correspondante de poison (en mk).
- b) Simulation de la charge d'équilibre du xénon. Du poison est ajouté afin de compenser l'absence de réactivité négative du xénon suite à une mise à l'arrêt d'environ 30 heures ou plus. La charge totale d'équilibre du xénon peut atteindre 28 mk à la pleine puissance.
- c) Surempoisonnement du réacteur pendant une mise à l'arrêt afin d'obtenir l'état d'arrêt garanti.
- d) Compensation de la réactivité due au surchargement de combustible, parfois appelée accumulation de réactivité dans la machine de chargement de combustible. Du poison additionnel est ajouté pour correspondre à la réactivité additionnelle imputable au combustible neuf. On procède ainsi pour permettre d'effectuer des pannes prévues de la machine de chargement de combustible.

2.4.1 Description du système

Un schéma du système général est illustré à la figure 2.4. Les réservoirs de mélange de poison se trouvent dans une zone accessible en régime de puissance. Un réservoir de désactivation est installé sur la conduite d'alimentation afin de permettre aux champs gamma émis par les isotopes de l'azote 16 (N^{16}) et de l'oxygène 19 (O^{19}) de se désintégrer jusqu'à des niveaux acceptables lorsque les réservoirs de mélange sont remplis en provenance du circuit du modérateur pendant le fonctionnement. Les réservoirs de poison sont équipés d'agitateurs, de jauges de niveau, de vannes d'échantillonnage, d'orifices pour l'addition de poison ainsi que de conduits et d'orifices d'éventage. La majeure partie de cet équipement est utilisé pour le remplissage des réservoirs de mélange. En particulier, l'agitateur permet d'assurer un bon mélange ainsi que la dissolution des poisons. Le bore présente un cas particulier en raison de sa faible solubilité.

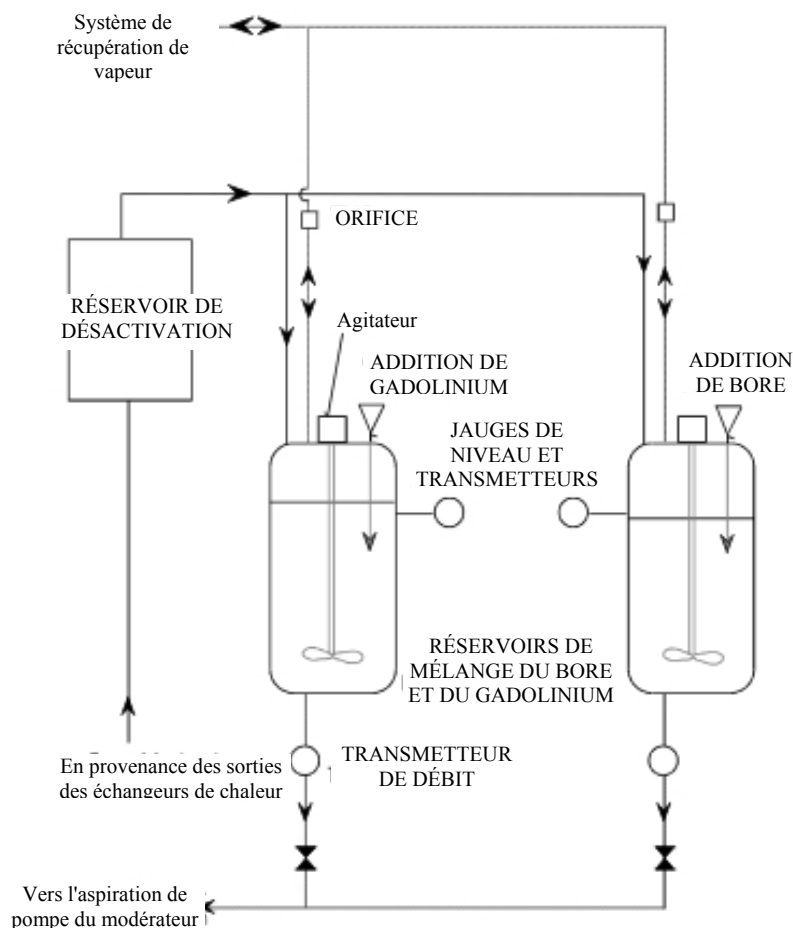


Figure 2.4
Système d'addition de poison au modérateur de type courant

2.4.2 Fonctionnement normal

Choix du poison

De façon générale, deux poisons absorbeurs de neutrons sont utilisés dans le circuit de poison liquide du modérateur. Selon leurs propriétés nucléaires et chimiques, un poison peut constituer un choix plus approprié qu'un autre pour une application donnée. Au tableau 4.1 figure une comparaison des deux poisons.

Tableau 2.1
Tableau comparatif des différents poisons

POISON	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Bore (B)	<ul style="list-style-type: none"> • Préféré pour le long terme (jours) en raison de sa combustion plus lente (pas besoin d'appoint ou très peu) et de l'enlèvement plus lent par les résines échangeuses d'ions • Mk/kg plus faible en cas d'addition de poison par inadvertance (poison plus faible) • Ne cause pas d'excursion du D₂ dans le gaz de couverture, en raison de sa conductivité en solution plus faible que celle du Gd. 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins soluble que le Gd, les matières solides non dissoutes risquent de bloquer les conduites et de réduire la valeur Δk négative (de manière dangereuse) dans le circuit. • Le nombre de résines échangeuses d'ions requises pour l'éliminer est plus grand que pour le Gd, par valeur mk.
Gadolinium (Gd)	<ul style="list-style-type: none"> • Préféré pour le court terme (<2 jours) en raison de la combustion plus rapide et de l'enlèvement plus rapide par les résines échangeuses d'ions. • Sa solubilité élevée permet 	<ul style="list-style-type: none"> • La conductivité en solution est plus élevée que celle de B. Cela augmente le risque d'excursion du D₂ en raison de la réduction de la recombinaison aqueuse naturelle. • Insertion de réactivité négative

	<p>d'obtenir une valeur mk élevée sans que le poison ne précipite.</p> <ul style="list-style-type: none">• Un nombre moins élevé de résines échangeuses d'ions est requis pour l'éliminer que pour le B, par valeur de mk.	<p>plus rapide (plus importante par kg de poison) en cas d'addition de poison par inadvertance.</p> <ul style="list-style-type: none">• Précipite lorsque le pH de la solution est >7.
--	--	--

Tableau 2.2
Applications particulières des poisons du modérateur

APPLICATION	CHOIX DU POISON ET JUSTIFICATION	RAISON DE L'ADDITION DE POISON
Simulation de la combustion du combustible neuf – avant le démarrage initial et pendant le fonctionnement initial lorsque la tranche contient du combustible neuf	Bore – taux de combustion du bore faible dans les champs de neutrons et taux d'enlèvement du bore faible par des résines échangeuses d'ions correspondant au taux de combustion lent du combustible et à l'accumulation lente des produits de fission.	Pour compenser la réactivité additionnelle du combustible neuf, en raison de l'absence de produits de fission à plus longue période radioactive (poisons) et pour compenser le pic de plutonium imminent dans le combustible neuf.
Pendant le chargement de combustible	Bore – taux de combustion et taux d'enlèvement du bore correspondant de près aux changements de réactivité du combustible neuf.	Pour compenser la réactivité additionnelle des nouvelles grappes de combustible, en partie à cause de l'absence de produits de fission à plus longue période radioactive (poisons).
Pendant le surchargement (contrôle de réglage de la réactivité de la machine de chargement)	Bore – taux de combustion et taux d'enlèvement du bore correspondant de près aux changements de réactivité du combustible neuf	Pour compenser la réactivité additionnelle due à l'excès de combustible
Pendant une panne prolongée	Gadolinium – taux d'enlèvement par des résines échangeuses d'ions plus rapides. La gadolinium est plus soluble que le bore et a une valeur de réactivité négative (en mk) par ppm dissous plus élevée. Le Gd ne précipite pas habituellement, à moins que le pH ne soit >7.	Pour rendre le réacteur fortement sous-critique. Pour compenser la perte de xénon et les effets de la réactivité.
Suite au démarrage après une panne due au poison (transitoire du xénon)	Gadolinium – le xénon s'accumulera presque au même taux que le gadolinium subit la combustion dans le flux neutronique. Ce léger déséquilibre peut être compensé par l'addition de Gd en provenance du réservoir de Gd ou par l'enlèvement du Gd par des colonnes échangeuses d'ions.	Pour compenser l'absence de xénon après une panne due au poison.
Après une forte augmentation de puissance, suite au fonctionnement continu à	Gadolinium – combustion s'effectuant presque au même taux que l'accumulation de xénon.	Forte augmentation de puissance après un fonctionnement à faible puissance qui diminuera initialement le niveau de xénon en raison du flux neutronique

Réacteurs à neutrons intermédiaires, générateurs de vapeur et auxiliaires

faible puissance		plus élevé. Le poison, s'il y a lieu, compensera la perte de xénon. Au fil du temps, l'augmentation du xénon atteindra une nouvelle concentration d'équilibre.
------------------	--	--

L'utilisation du poison durant un démarrage suite à une panne prolongée se fait en deux étapes :

1. Démarrage suite à une mise à l'arrêt de plus de trois jours

Le démarrage à pleine puissance suite à une période de trois jours ou plus de mise à l'arrêt peut débuter en l'absence de xénon dans le cœur, tel qu'indiqué à la figure 2.5. Le xénon s'accumulera jusqu'à environ -28 mk de réactivité presque au même taux que la combustion de gadolinium par l'enlèvement du flux neutronique lui-même. Il y aura un certain déséquilibre indiqué par les changements dans les niveaux de zone moyens. Tout déséquilibre peut être compensé par l'addition ou l'enlèvement de gadolinium en ouvrant la vanne des résines échangeuses d'ions Gd.

2. Démarrage suite à une mise à l'arrêt de 1.5 à 3 jours

Le démarrage à pleine puissance après une mise à l'arrêt d'une durée de 1.5 à 3 jours à partir de la pleine puissance verra une compensation de xénon semblable à celle indiquée à la figure 2.6. Il faut ajouter du gadolinium tel qu'indiqué durant la période de combustion du xénon. Pendant l'accumulation de xénon qui suivra, la combustion du gadolinium s'effectuera à peu près au même taux. Tout déséquilibre détecté par le niveau de zone moyen sera encore contrôlé par l'addition ou l'enlèvement de gadolinium, tel que mentionné précédemment. Le démarrage effectué environ 35 heures après la mise à l'arrêt est illustré à la figure 2.6.

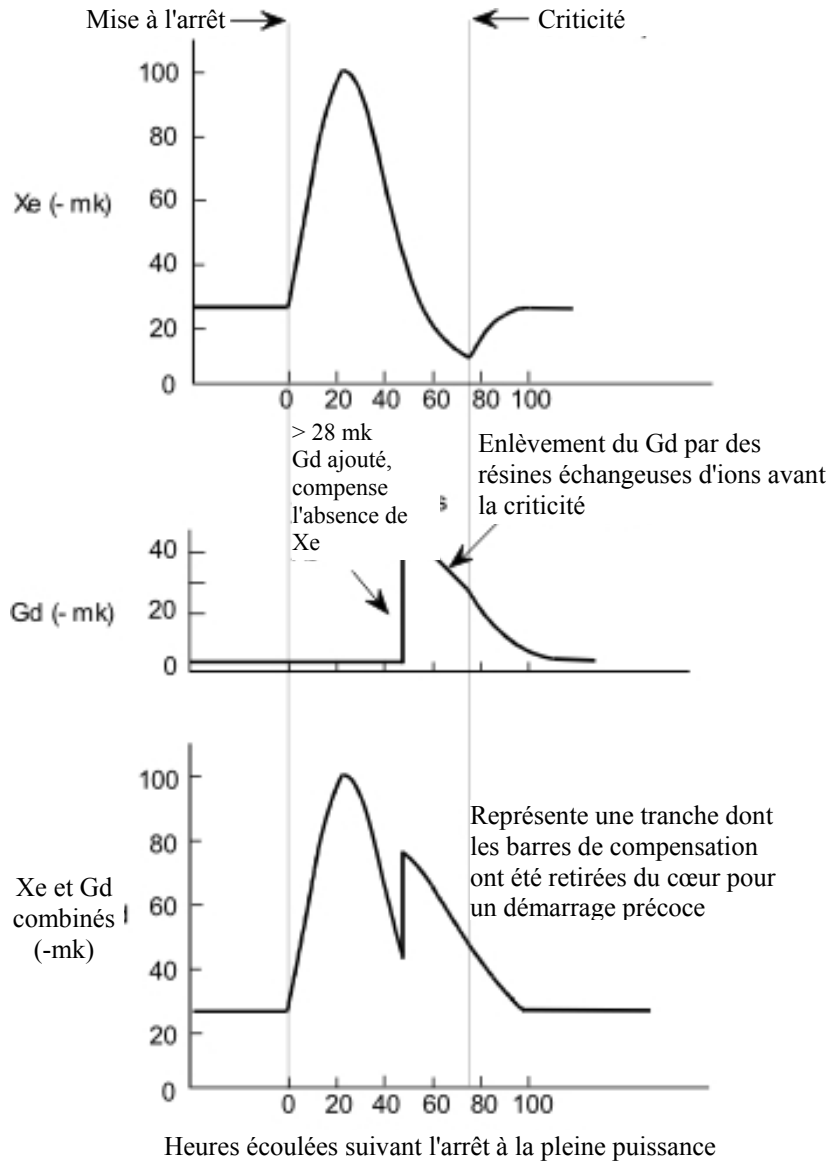


Figure 2.5

Concentration de Gd dans le modérateur après un arrêt d'environ 3 jours

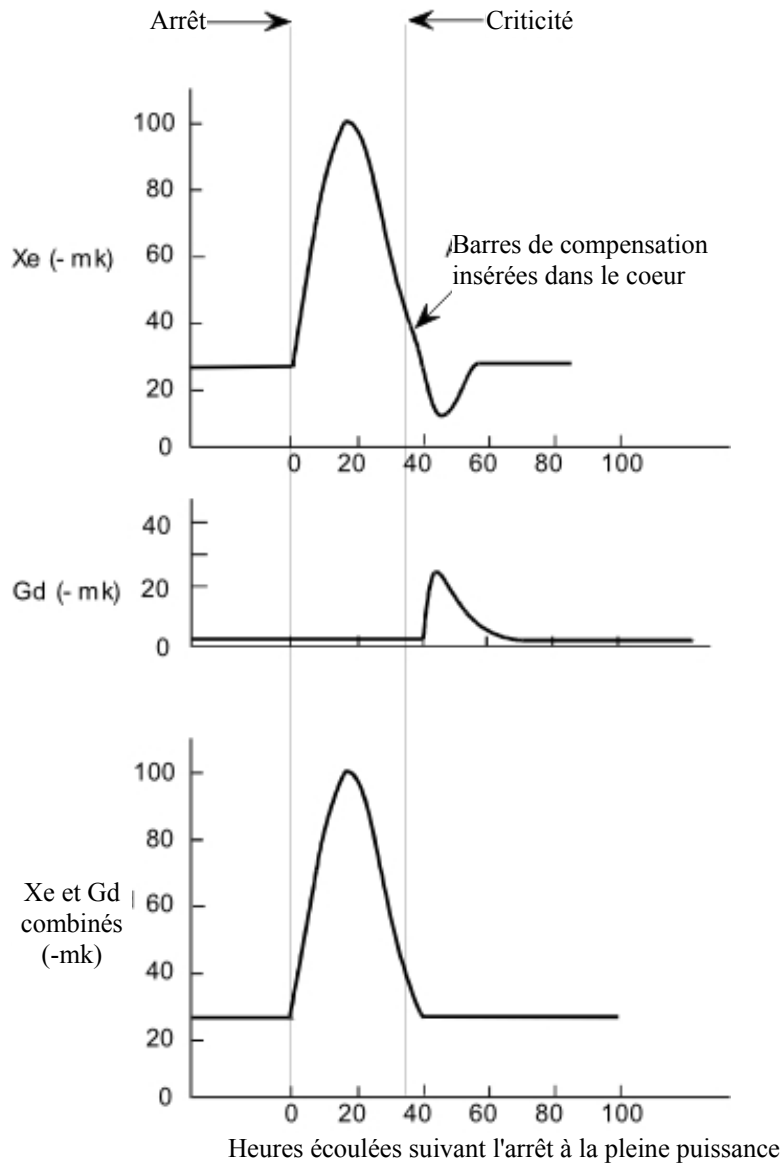


Figure 2.6
Concentration de Gd dans le modérateur lors d'un démarrage 2 à 3 jours après un arrêt

2.4.3 *Surveillance et contrôle*

L'addition manuelle de poison au modérateur s'effectue habituellement à partir de la salle de commandes, bien qu'il soit également possible de le faire sur le terrain. Pour surveiller et contrôler l'addition de poison, l'opérateur de salle de commandes doit généralement surveiller les points suivants :

- la position des commutateurs manuels pour les vannes motorisées sur les conduites d'addition de poison liquide, en aval des réservoirs de mélange
- le débit du poison liquide, à l'aide du transmetteur de débit
- le niveau du réservoir de poison, indiqué par les transmetteurs de niveau et par le dispositif de secours des jauges de niveau sur le terrain
- la réponse de la zone liquide moyenne à l'addition de poison.

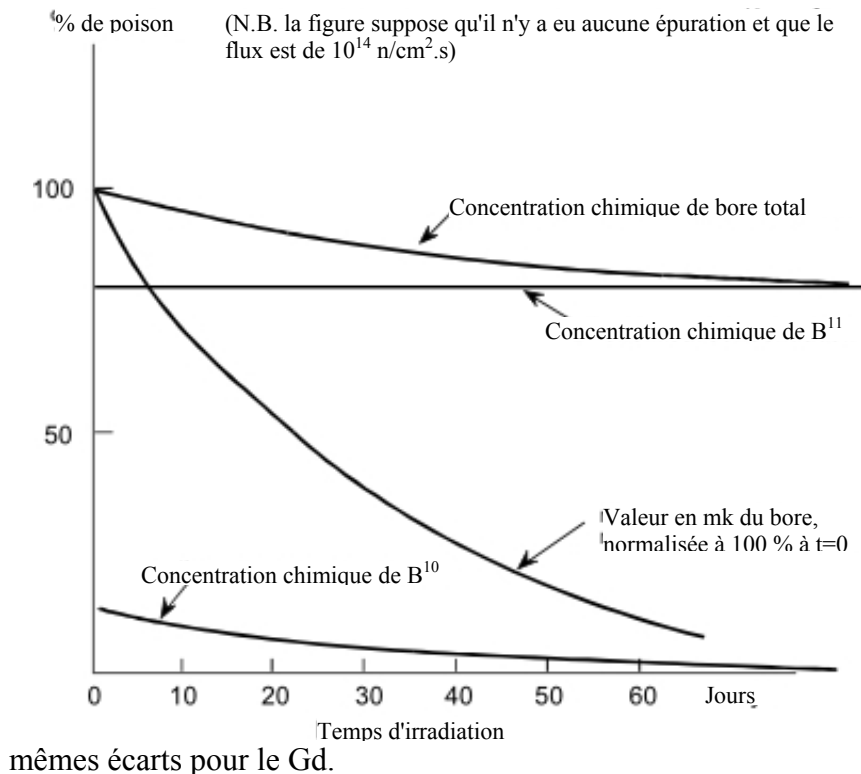
Pour s'assurer que la quantité exacte de poison a été ajoutée, deux sources d'information sont généralement disponibles :

1. s'assurer que le niveau de zone moyen se situe dans une plage de contrôle acceptable pour le SRR
2. l'échantillonnage du circuit du modérateur pour déterminer la concentration de poison à l'aide d'une analyse chimique en laboratoire lors de la mise à l'arrêt.

Lorsque l'on ajoute du poison pendant que le réacteur est critique, il convient de surveiller le niveau de zone moyen pour les raisons suivantes : démarrage initial avec du combustible neuf, chargement de combustible, ou transitoire du xénon. Cela permettra de déterminer s'il est nécessaire d'ajouter ou d'enlever du poison afin de s'assurer que les niveaux de zone demeurent à l'intérieur de la plage de contrôle acceptable.

Pendant une panne prolongée, ou un état d'arrêt garanti, on doit s'assurer que le niveau de poison est approprié. Pour ce faire, il sera nécessaire de procéder au prélèvement d'échantillon dans le circuit du modérateur afin de déterminer la concentration de poison à l'aide d'analyse chimique. Depuis que les zones ne sont plus contrôlées dans cet état et que le réacteur est fortement sous-critique, le niveau de zone n'indiquera plus le niveau de poison.

L'échantillonnage destiné à l'analyse chimique donnera une bonne indication de la concentration réelle de poison disponible étant donné que seule une légère irradiation du poison s'est produite. Cependant, lorsque les poisons sont irradiés, les isotopes absorbeurs de neutrons subissent une combustion. La concentration chimique de poison ne sera plus liée à la valeur en mk du poison. Ainsi, l'échantillonnage pendant un transitoire du xénon ou pendant l'accumulation de réactivité suite au chargement de combustible, n'indiqueront pas clairement s'il y a suffisamment de poison dans le modérateur pour fournir la valeur en mk requise. Les figures 2.7 et 2.8 indiquent comment la concentration de poison et la valeur en mk de poison varient en fonction du temps d'irradiation. La figure 2.7 illustre l'écart dans la valeur en mk du bore et dans la concentration chimique du bore en fonction du temps d'irradiation. La figure 2.8 illustre les



mêmes écarts pour le Gd.

Figure 2.7

Variation de la valeur en mk du bore et concentration chimique du bore en fonction du temps d'irradiation

La plupart des centrales disposent d'un mécanisme d'addition du gadolinium automatique, où le système de régulation du réacteur

contrôle l'addition de poison. Le SRR contrôle automatiquement la puissance du réacteur lors d'une faible augmentation non contrôlée de la puissance du réacteur. Le dispositif d'addition automatique devrait ramener le réacteur dans la plage de contrôle après que les zones aient été remplies et que les absorbeurs aient été insérés.

Dans certaines centrales, l'addition de poison automatique peut également être initiée si le niveau du pressuriseur est faible peu après que la pression du gaz de couverture du modérateur ait été élevée (cela indique possiblement une défaillance d'un tube de force).

Il n'y a aucun mécanisme d'addition automatique du bore. On doit l'ajouter manuellement.

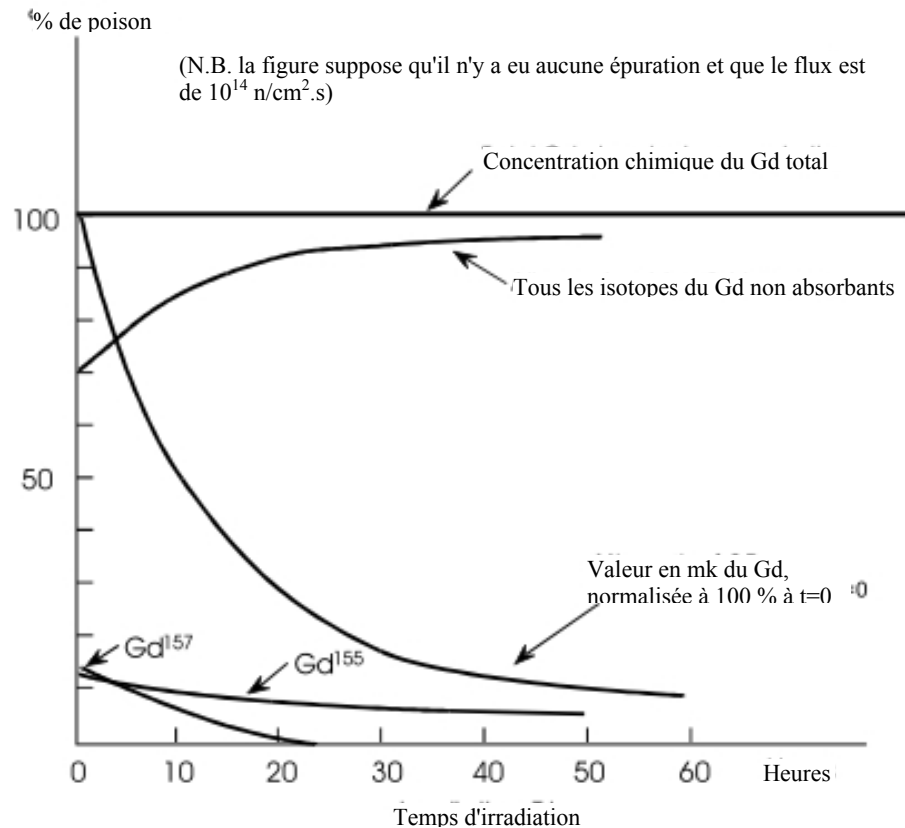


Figure 2.8
Variation de la valeur en mk du gadolinium et concentration chimique en fonction du temps d'irradiation

2.4.4 Situations opérationnelles anormales

Il existe cinq situations opérationnelles inhabituelles pour le circuit de poison liquide du modérateur.

Addition de poison par inadvertance à pleine puissance

Lorsque l'on ajoute du poison par inadvertance, les effets suivants fort préoccupants pour l'exploitation de la tranche risquent de se produire :

1. i) perte de contrôle de zone normale – les zones liquides se draineront pour éliminer l'eau ordinaire, absorbeur de neutrons, afin de compenser l'addition de poison. Cela peut entraîner le mouvement d'autres dispositifs de réactivité afin de composer le drainage de la zone ou la perte de contrôle spatial si les barres de compensation ne sont pas retirées.
2. ii) dépassement de la limite de poison autorisée – une limite supérieure pour la charge de poison du modérateur à puissance élevée et des conditions d'équilibre existent, afin d'éviter la réactivité positive en excès en cas d'APRP dans le cœur dans le circuit caloporteur.
3. iii) panne due au poison – si la quantité de réactivité négative ajoutée ne peut être compensée, une panne forcée surviendra.

Enlèvement de poison par inadvertance à pleine puissance

Lorsque du poison est enlevé par inadvertance hors du modérateur, le niveau de zone moyen augmente pour compenser l'enlèvement du poison. Lorsque les zones se remplissent, des absorbeurs sont insérés pour ajouter de la réactivité négative afin de ramener les zones en contrôle. Si l'on enlève davantage de poison, le SRR, dans la plupart des tranches, ajoutera automatiquement du gadolinium afin d'insérer de la réactivité négative. Même si la puissance est contrôlée, une perturbation de puissance dans une tranche résultera de cet événement.

Enlèvement de poison par inadvertance lors du démarrage

S'il y a enlèvement de poison par inadvertance Durant le démarrage, le réacteur atteindra la criticité beaucoup plus rapidement que prévu. Encore une fois, la puissance sera

éventuellement contrôlée, mais accompagnée d'une perturbation de puissance dans une tranche.

Utilisation de bore alors que l'on devrait utiliser du gadolinium

Le gadolinium est généralement préféré pour les effets à court terme comme le remplacement des effets du poison (xénon). L'utilisation de bore à la place augmenterait le temps d'enlèvement du poison. Le temps de combustion pour le bore est beaucoup plus élevé que pour le gadolinium, ce qui augmente le temps d'enlèvement par cette méthode. L'enlèvement du bore par des colonnes échangeuses d'ions du circuit d'épuration est plus long et nécessite un plus grand nombre de colonnes qui à leur tour entraînent des coûts additionnels. En fait, l'épuration devrait être disponible et en service lorsque l'on insère du bore. Avec le gadolinium, il n'est pas nécessaire de faire fonctionner le circuit d'épuration car la combustion se produit beaucoup plus rapidement que dans le cas du bore.

Non-disponibilité du poison

Lorsque le système d'addition de poison liquide n'est pas disponible, il sera plus difficile de traiter les situations d'addition de poison normale à pleine puissance mentionnées précédemment. Lorsque l'addition de bore n'est pas disponible, il devient difficile de compenser la réactivité additionnelle imputable au combustible neuf ou au chargement. Lorsque l'addition de gadolinium n'est pas disponible, il devient difficile de compenser la présence de xénon suite à un transitoire du xénon. Le fonctionnement de la tranche à pleine puissance se poursuivra probablement, mais il sera peut-être nécessaire de revoir la stratégie d'exploitation.

2.4.5 Notions principales

- On ajoute du bore au modérateur avant le démarrage initial lorsque le réacteur contient du combustible neuf. On peut également l'ajouter pendant le chargement de combustible, ou lors du surchargement. Le taux de combustion du bore est plus lent, ce qui correspond à peu près au taux de combustion du combustible et à l'accumulation des produits de fission. Il est nécessaire d'avoir recours au poison pour compenser la réactivité additionnelle du combustible neuf.
- On ajoute du gadolinium lors des pannes prolongées parce que son enlèvement est plus rapide. La présence de poison est

nécessaire pour maintenir le réacteur sous-critique et pour compenser la perte de xénon.

- Suite au démarrage après une panne due au poison, et après une forte augmentation de puissance suivant un fonctionnement continu à faible puissance, on ajoute du gadolinium étant donné que sa combustion se fait à peu près au même taux que l'accumulation de xénon. Du poison est requis pour compenser l'absence ou la réduction des niveaux de xénon dans le combustible.
- Lorsque du poison est ajouté manuellement, l'opérateur de salle de commandes peut surveiller et contrôler la position des commutateurs manuels pour les vannes motorisées sur les conduites d'addition de poison liquide, et contrôler le débit du poison, le niveau du réservoir de poison ainsi que la réponse de zone liquide moyenne à l'addition de poison.
- Pour s'assurer que la quantité adéquate de poison a été ajoutée lorsque le réacteur est critique, le niveau de zone moyen doit être surveillé. Pendant une panne prolongée, ou à l'état d'arrêt garanti, le niveau de poison du circuit du modérateur doit faire l'objet d'un échantillon et d'une analyse chimique en laboratoire.
- Le SRR ajoute automatiquement du gadolinium dans la plupart des tranches, afin de contrôler la puissance du réacteur lors d'une augmentation non contrôlée mais lente de la puissance du réacteur.
- Si du poison est enlevé par inadvertance à pleine puissance, le niveau de zone moyen augmentera. Il pourrait s'ensuivre une perturbation de puissance dans une tranche.
- Si du poison est enlevé par inadvertance lors du démarrage, la criticité pourrait survenir beaucoup plus rapidement que prévue, et encore une fois une perturbation de puissance serait possible dans une tranche.
- Si l'on ajoute du bore alors qu'il faudrait ajouter plutôt du gadolinium, le temps d'enlèvement du poison sera beaucoup plus long, car le temps d'enlèvement par des résines échangeuses d'ions et le temps de combustion sont plus longs. Les coûts de l'enlèvement de poison seront également plus élevés.

- Si une non-disponibilité de poison se produit, les situations où l'addition de poison à pleine puissance est nécessaire ne seront pas réglées, ce qui pourrait avoir une incidence sur l'exploitation.

2.5 Circuit d'épuration du modérateur

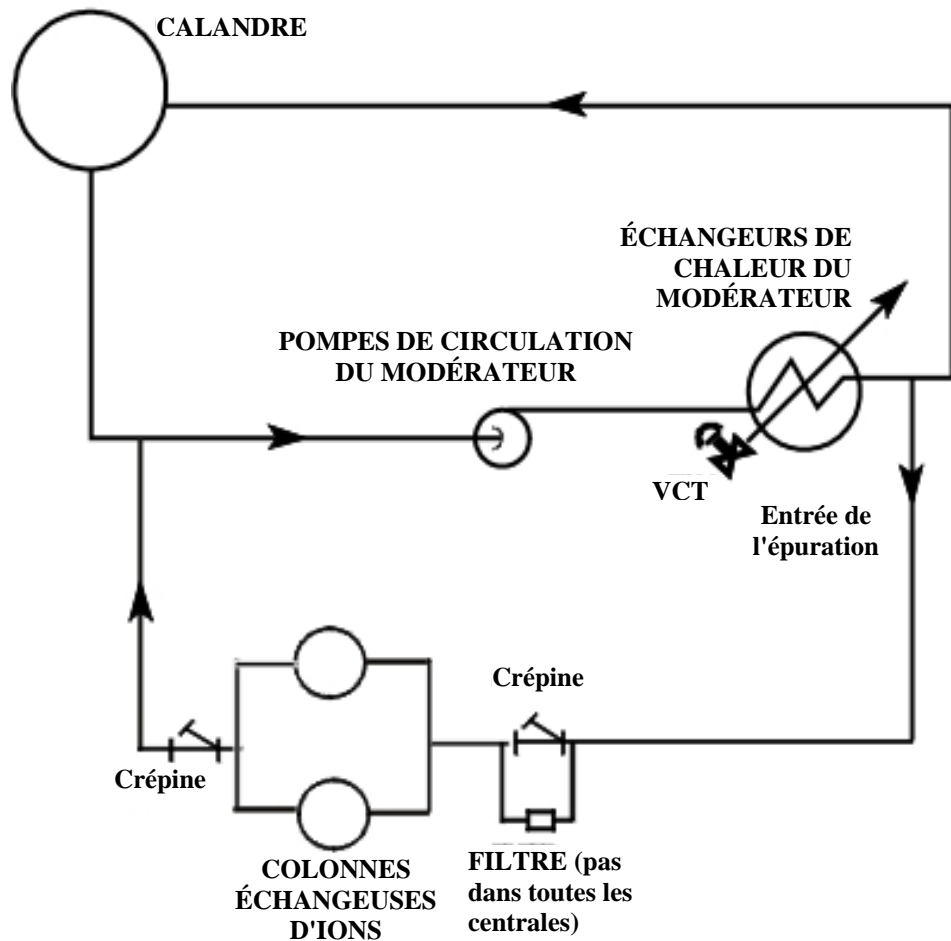


Figure 2.11
Circuit d'épuration du modérateur de type courant

Dans la présente section, vous apprendrez les méthodes utilisées pour éliminer les impuretés du modérateur. Trois modes de fonctionnement du système sont décrits : nettoyage normal, enlèvement du gadolinium et enlèvement du bore.

Les paramètres d'exploitation importants qui doivent être maintenus dans tous ces modes de fonctionnement sont également examinés.

2.5.1 Pureté du modérateur

Des produits de corrosion, qui constituent les impuretés dans le circuit, se présentent sous forme de matériaux en suspension dans l'eau et d'ions dissous. Les ions peuvent également être ajoutés volontairement à titre de poison absorbeur de neutrons en vue du contrôle de la réactivité ou de la mise à l'arrêt. À long terme, la fonction du circuit d'épuration consiste à maintenir le modérateur (D₂O) relativement exempt de matières indésirables, afin de s'assurer que le danger d'explosion du D₂ est réduit au minimum grâce à la radiolyse moins importante, que la corrosion est faible et que l'absorption des neutrons est faible.

Cette fonction peut être accomplie de trois manières :

1. contrôle du pH
2. utilisation de crépines et de filtres
3. utilisation de colonnes échangeuses d'ions.

Le pH est maintenu à 7 environ, surtout pour s'assurer que les cloisons du modérateur ne sortent pas de solution, mais également pour réduire au minimum la corrosion des composants en acier inoxydable.

On trouve des crépines à l'entrée et à la sortie des colonnes échangeuses d'ions. Elles éliminent les matières particulaires qui peuvent se trouver dans le circuit, particulièrement les fines de résines. Certaines centrales possèdent un filtre à l'entrée de la boucle d'épuration, afin de recueillir tous produits de corrosion ou matières en suspension.

Les colonnes échangeuses d'ions éliminent les impuretés solubles afin de réduire la conductivité, tel que discuté au chapitre sur la conductivité. Il s'agit habituellement de résines mixtes qui éliminent les ions positifs et négatifs (cations et anions).

2.5.2 Modes de fonctionnement du système

L'enlèvement du gadolinium et du bore peut nécessiter l'emploi de résines à base d'acides forts ou de bases fortes basiques ainsi que différentes techniques d'enlèvement. Le gadolinium est un élément à fort caractère ionique et les ions libérés sont facilement piégés par les colonnes échangeuses d'ions. Cependant, le bore est un élément à

faible caractère ionique en solution et les ions qu'il libère ne sont pas facilement piégés par les colonnes échangeuses d'ions.

Nettoyage normal

Pour s'assurer que la colonne échangeuses d'ions enlève tous les ions pendant le nettoyage normal, la spécification de la conductivité globale est surveillée. Certains ions particuliers sont également surveillés, notamment le chlore, le nitrate, le gadolinium et les radionucléides. Un débit continu à travers une colonne échangeuse d'ions convient pour maintenir ces spécifications. Le débit réel varie d'une centrale à une autre, mais se situe souvent entre 5 et 7 kg/s par colonne. Le dépassement de ce taux peut endommager les résines et entraîner une dispersion subséquente des fines de résines dans le circuit du modérateur. Si un débit plus élevé est requis pour le nettoyage, une colonne additionnelle peut être mise en service.

Une colonne échangeuse d'ions pour le nettoyage normal ne sera pas très efficace pour enlever le bore, mais enlèvera tous les ions précités.

Enlèvement du gadolinium

Les résines échangeuses d'ions enlèvent le gadolinium facilement en raison de son fort caractère ionique. Pour les ions de ce type, la notion de période d'épuration s'applique. Cette expression se rapporte au temps requis pour réduire la concentration d'ions à la moitié de sa valeur initiale. Le temps de la période de nettoyage du gadolinium dépend du débit d'épuration et de la masse totale de modérateur (D₂O). Pour une tranche donnée, la seule variable normale est le taux d'épuration, qui à son tour dépend du nombre de colonnes en service.

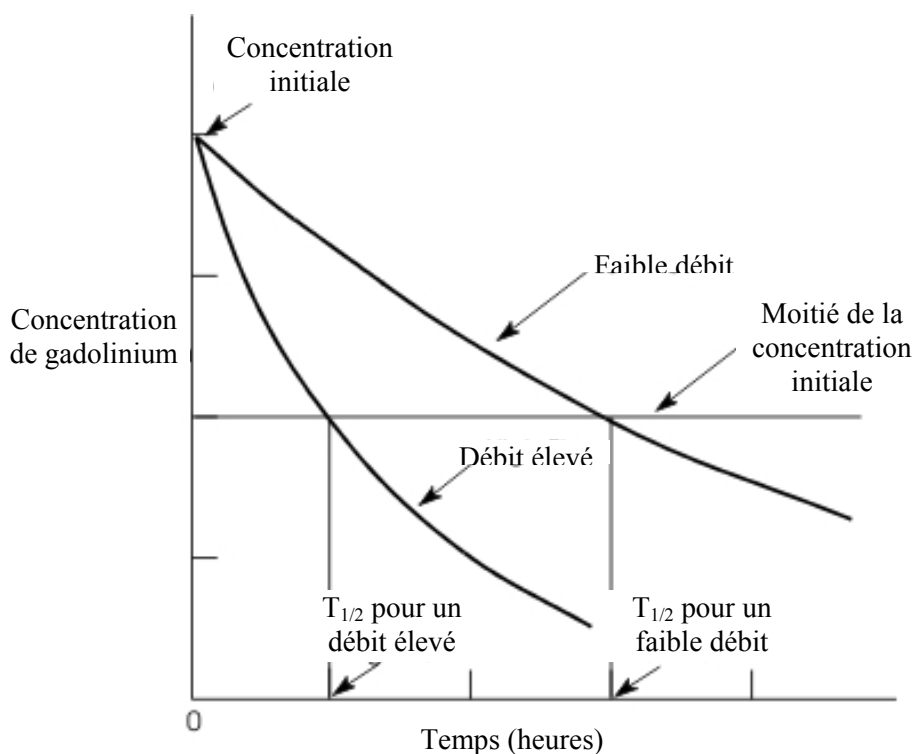


Figure 2.10
Période d'épuration du modérateur représentative des différents débits d'épuration

La figure 2.10 illustre l'évolution de la concentration de gadolinium en fonction du temps pour différents débits d'épuration. Le temps de réduction de la concentration initiale à la moitié de sa valeur est représenté pour différents débits d'épuration. Évidemment, pour augmenter l'écoulement d'épuration de manière importante, on doit accroître également le nombre de colonnes échangeuses d'ions parallèles en service.

Lorsque le système d'injection de poison est mis en marche pour arrêter le réacteur, il insère environ 600 mk de réactivité négative dans le modérateur. Par exemple, à un débit de 20 kg/s, la période de nettoyage sera d'environ 3 ½ heures. Cinq périodes permettraient de réduire le gadolinium à -19 mk. Pour cinq périodes, il faudrait environ 17,5 heures à ce débit. Ce temps de nettoyage est trop long pour éviter une panne due au poison. Cependant, parce que le temps de nettoyage est conjugué au temps requis pour rééquilibrer le SAU#2, entre 40 et 45 heures se seront écoulées. Ce délai sera suffisant pour permettre au xénon de se désintégrer jusqu'au niveau du démarrage.

Lorsque l'on ajoute du gadolinium pour la simulation du xénon, le taux de combustion s'approche du taux auquel s'accumule la réactivité du

xénon, de sorte que l'enlèvement de l'épuration n'est pas requis initialement. La concentration de poison (gadolinium) diminue naturellement dans les champs de neutrons, avec une période de combustion d'environ 8 heures au début, puis plus longue à mesure que la section efficace la plus élevée de l'isotope subit la combustion. Les fluctuations du niveau de zone moyen indiqueront tout écart entre les deux taux. Lorsque le poison a brûlé et que le xénon s'est accumulé jusqu'à son niveau normal, les isotopes du gadolinium doivent être enlevés par un nettoyage normal afin de maintenir la conductivité du modérateur (D_2O) à l'intérieur des spécifications.

Enlèvement du bore

Comme le bore est un élément à faible caractère ionique en solution, l'enlèvement des ions qu'il libère est plus difficile et prend plus de temps. Le taux d'enlèvement dépend de la différence entre la concentration de bore en solution et la concentration de bore dans la colonne échangeuse d'ions. La colonne échangeuse d'ions qui enlève le bore atteindra, au fil du temps, un équilibre avec le bore en solution, de sorte que le bore ne pourra plus être enlevé. La colonne est alors dite saturée ou borée. De la même manière, une colonne échangeuse d'ions dont la concentration en bore est plus élevée que celle du modérateur formera une concentration d'équilibre avec la solution et libérera du bore dans le modérateur. L'établissement des concentrations d'équilibre dans la solution se produit seulement avec des substances à faible caractère ionique et ne se produit pas lorsqu'une substance à fort caractère ionique, comme le gadolinium, est fixée sur une colonne échangeuse d'ions.

Comme le bore (B) atteint une concentration d'équilibre avec la solution, il est retiré du modérateur suivant une technique d'échange d'ions en plusieurs étapes à l'aide de deux ou trois colonnes échangeuses d'ions fonctionnant pour différentes concentrations de bore dans le modérateur. Par exemple, supposons que l'on enlève en deux étapes 3 mg B/kg de D_2O ou 28 mk de réactivité. Une colonne peut réduire la concentration et la faire baisser à 0,5 mg B/kg de D_2O , point auquel elle deviendra saturée. La colonne est ensuite isolée et une colonne neuve est utilisée pour la deuxième étape de l'enlèvement du bore afin de réduire davantage la concentration de bore. La colonne est ensuite utilisée la fois suivante pour la première étape de l'enlèvement du bore, afin de réduire au minimum l'utilisation des résines. De façon générale, pour l'enlèvement du bore, une colonne échangeuse d'ions neuve laissera environ le septième de la concentration originale de bore après saturation.

De cette façon, le taux d'enlèvement du bore ne peut pas être déterminé par la courbe de période normale de la figure 2.10, étant donné qu'il y a d'autres facteurs mis à part le débit d'épuration et la masse totale du modérateur (D_2O). La capacité d'enlèvement du bore des colonnes échangeuses d'ions est également fonction de la température. Une augmentation de quelques degrés dans la colonne échangeuse d'ions abaissera la concentration d'équilibre dans la colonne échangeuse d'ions, ce qui réduira sa capacité à enlever le bore. En fait, elle pourrait même rejeter du bore hors de la résine.

La concentration de bore diminue lentement dans les champs de neutrons, avec une période de combustion entre 1 et 20 jours selon le flux du réacteur. En raison de la longue période de combustion, les colonnes échangeuses d'ions devront peut-être enlever le bore. Un nettoyage normal est requis même lorsque le bore a subi une combustion complète afin de réduire les effets de la conductivité sur le modérateur.

Si du bore ou du gadolinium se trouvent toujours dans le modérateur même lorsque les effets de réactivité recherchés ne sont plus requis, une réactivité positive additionnelle doit être fournie pour contrecarrer les effets du poison. Le contrôle de réactivité normal et le niveau de zone liquide moyen peuvent empêcher que ces effets de réactivité se produisent. Le fait de maintenir le gadolinium dans le modérateur alors qu'il n'est plus requis maintiendra également la conductivité à un niveau élevé, ce qui contribuera à la présence accrue de produits de radiolyse. La troisième préoccupation est d'ordre financier. Les coûts en combustible augmentent lorsque le réacteur est exploité avec trop de poison.

2.5.3 Paramètres de fonctionnement

Dans cette section, quatre paramètres importants qui caractérisent le fonctionnement du système sont examinés : débit d'épuration, température d'entrée, pression et conductivité du modérateur.

Pour chacun de ces paramètres, vous apprendrez comment ils sont maintenus et quelles sont les conséquences néfastes du dépassement des limites.

Débit d'épuration

Les réacteurs CANDU utilisent un système de contournement du débit d'épuration autour des pompes de circulation du modérateur, tel qu'indiqué à la figure 2.9.

Habituellement, l'entrée d'épuration se trouve en aval de la décharge de l'échangeur de chaleur du modérateur. La pression différentielle de la pompe du modérateur est utilisée comme force motrice pour la boucle d'épuration. Habituellement, entre 4 et 6 colonnes sont disponibles en parallèle. Les colonnes additionnelles permettent la formation de boue à partir des résines épuisées alors que l'épuration se poursuit. Le nombre de colonnes en service dépend des exigences relatives à l'enlèvement du poison.

Le débit d'épuration habituel se situe entre 5 et 25 kg/s, selon le nombre de colonnes échangeuses d'ions en service (et de la centrale). Le dépassement des débits recommandés peut endommager les résines. Une vanne motorisée à l'entrée de chaque colonne permet de l'isoler.

Dans certaines centrales, on a découvert qu'en présence de débits élevés, la quantité de fines de résine augmente en raison du bris mécanique. Les fines peuvent être transportées par les crépines de décharge échangeuses d'ions et boucher le circuit. Le processus d'échange d'ions est également moins efficace lorsque le débit est élevé.

Un faible débit d'épuration fait en sorte que le nettoyage du modérateur est plus long. En fait, lorsque le débit est très faible, le taux auquel les impuretés sont produites peut dépasser le taux d'épuration, alors même si l'épuration se fait, le niveau d'impuretés peut augmenter.

Température d'entrée

Dans la plupart des centrales, le refroidissement est assuré par l'échangeur de chaleur du modérateur. L'entrée d'épuration se trouve en aval de la principale sortie de l'échangeur de chaleur du modérateur. Les résines échangeuses d'ions sont sensibles à la température. Leur température doit être maintenue en deçà d'environ 60 °C afin d'éviter qu'elles ne soient endommagées et qu'il y ait rejet de contaminants comme des chlorures, du bore et du gadolinium. Les résines échangeuses d'ions borées sont particulièrement sensibles aux changements de température lorsqu'elles sont à l'équilibre avec le modérateur (D₂O). Une légère augmentation de température peut libérer du poison (bore) dans le circuit. Les températures d'entrée de l'épuration se situent habituellement entre 30 et 35 °C.

Pression

Les pompes de circulation du modérateur maintiennent la pression d'épuration. La pression différentielle de la pompe est d'au moins

650 kPa et la pression est réduite à la calandre par des dispositifs de restriction du débit. Comme la baisse de pression dans le circuit d'épuration est d'environ 400 kPa, la pression différentielle de la pompe assurera une pression suffisante pour un écoulement adéquat. Lorsque ΔP de part et d'autre d'une crépine (filtre) augmente, le composant doit être changé ou nettoyé. Si la crépine n'est pas changée, l'écoulement diminuera graduellement jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de débit d'épuration.

Conductivité

La conductivité du modérateur est une mesure de la concentration des impuretés ioniques. Elle est surveillée par des cellules de conductivité en ligne et par un échantillonnage en laboratoire d'analyse chimique. La conductivité doit être maintenue à un faible niveau en raison du fait que les impuretés dissoutes augmentent le taux naturel de D_2 et que la recombinaison du O_2 diminue. En outre, l'absorption de neutrons devient plus importante et la corrosion risque de s'installer.

La conductivité est habituellement maintenue à une valeur inférieure à 0,1 mS/m grâce à une épuration continue à l'aide de résines échangeuses d'ions. Une augmentation de la conductivité du modérateur indique habituellement la présence de résines échangeuses d'ions épuisées dans la colonne. D'autres méthodes pouvant laisser supposer qu'une colonne échangeuse d'ions est épuisée comprennent notamment :

- vérifier ΔP de part et d'autre de la colonne échangeuse d'ions (bouchons);
- observer la réduction du niveau de zone moyen (lixiviation du bore hors de la résine);
- vérifier les lectures de chlorure accru à la sortie de la colonne.

L'utilisation continue de résines épuisées pour l'épuration donnera lieu à une augmentation de la conductivité à la sortie, ce qui risque de causer une excursion du D_2 . Cela s'explique par le fait que les impuretés ne sont pas enlevées ou que d'autres impuretés peuvent être rejetées par les résines. Il existe d'autres manières de détecter les résines épuisées, tel que mentionné précédemment.

L'utilisation continue d'une colonne de bore saturé ne diminue pas la teneur en bore. En fait, à mesure que les impuretés (espèces ioniques)

remplacent le bore faiblement adsorbé, davantage de poison (bore) et de contaminants sont rejetés dans le circuit.

Un autre facteur contribuant à la conductivité est la présence de fines de résines qui s'échappent dans le circuit du modérateur. Si elles ne sont pas enlevées, elles augmenteront la conductivité en rejetant des ions en solution, ce qui produira une concentration plus élevée de D_2 et des excursions de D_2 possibles. Si les niveaux de D_2 dans le gaz de couverture sont élevés, il y aura danger d'explosion, ce qui nécessitera une mise à l'arrêt de la tranche.

2.5.4 *Fonctionnement durant l'état d'arrêt garanti*

L'une des méthodes ayant pour but de placer le réacteur à l'état d'arrêt garanti consiste à ajouter un excès de poison absorbeur de neutron au modérateur afin de s'assurer que le réacteur n'atteint pas la criticité. Pendant cet état, le système d'épuration du modérateur sera isolé dans le cadre de l'état d'arrêt garanti. Cette démarche vise à s'assurer que le poison ne sera pas enlevé par inadvertance.

2.5.5 *Notions principales*

- La pureté du modérateur est maintenue afin de réduire au minimum les produits de radiolyse, la corrosion et l'absorption des neutrons. Le contrôle du pH (neutre), les crépines et les filtres, et les colonnes échangeuses d'ions permettent de contrôler la pureté du modérateur.
- La période d'épuration est le temps requis pour réduire la concentration d'ions à la moitié de sa valeur initiale.
- L'enlèvement du gadolinium dépend du débit d'épuration.
- Le bore est enlevé à l'aide d'une technique en plusieurs étapes parce que les colonnes échangeuses d'ions deviennent vite saturées de bore.
- Le bore ou le gadolinium devraient être enlevés lorsqu'ils ne sont plus requis parce que le contrôle de réactivité normale peut être affecté. Le nitrate de gadolinium contribue à la conductivité qui à son tour augmente les produits de radiolyse. Les deux poisons peuvent générer des coûts en combustible accrus.
- L'écoulement est maintenu à l'aide de la pompe principale de circulation du modérateur (ΔP) comme force motrice pour la

boucle d'épuration. Lorsque le débit d'épuration est important, le processus d'échange d'ions est moins efficace et les résines peuvent être endommagées, ce qui risque de boucher les crépines ou les filtres et d'accroître la présence d'impuretés dans le modérateur. Un faible débit d'épuration n'éliminera peut-être pas les impuretés à mesure qu'elles se forment.

- La température d'entrée de l'échange d'ions doit être contrôlée pour s'assurer que la température d'entrée élevée n'endommage pas les résines. Les colonnes d'enlèvement du bore sont particulièrement sensibles au rejet de bore lorsque la température augmente.
- La pression d'épuration est maintenue à l'aide de la pression de décharge de la pompe principale du modérateur et par la surveillance de ΔP de part et d'autre des composants dans la boucle d'épuration. Lorsque ΔP est élevé, le débit d'épuration est réduit.
- Les colonnes échangeuses d'ions maintiennent une faible conductivité. La conductivité de sortie et d'autres paramètres sont échantillonnés et les échantillons sont envoyés au laboratoire d'analyse chimique afin de déterminer si la colonne est épuisée. L'utilisation continue d'une résine épuisée donne lieu à une conductivité de sortie plus élevée. D'autres indications que la résine est épuisée comprennent notamment un débit d'échange d'ions réduit (résine endommagée), des niveaux de zone qui diminuent ou des niveaux de chlorure plus élevés. L'utilisation continue d'une colonne saturée de bore peut libérer davantage de bore dans le système car la présence d'impuretés (espèces ioniques) dans la colonne est plus grande.
- La résine qui s'échappe dans le modérateur peut contribuer à provoquer des excursions de D_2 gazeux.
- Le circuit d'épuration du modérateur est isolé dans le cadre de l'état d'arrêt garanti en surempoisonnement afin de s'assurer que le poison ne sera pas enlevé par inadvertance.

2.6 Exercices

2.6.1 Modérateur (eau lourde)

2. Donner un exemple d'une indication qui avertit le personnel de salle de commandes que la teneur isotopique est basse.
3. Que se produit-il si la teneur isotopique du modérateur est soudainement réduite de :
 - a) $\leq 0,3 \%$
 - b) $> 0,3 \%$
4. Décrire les dangers radiologiques associés à l'eau du modérateur contenue dans les ouvrages (conduites) et au déversement de modérateur (D_2O). Décrire les états de fonctionnement à l'arrêt et à puissance élevée.
5. Décrire deux manières d'utiliser le circuit du modérateur pour garantir que le réacteur est à l'arrêt.

2.6.2 Système de circulation du modérateur

6. Décrire quatre conséquences du dépassement de la température de sortie du modérateur.
7. Préciser deux circonstances à la suite desquelles il pourrait y avoir perte de refroidissement du modérateur.
8. Décrire cinq conséquences de la perte de source froide du modérateur.
9. Décrire deux conséquences néfastes d'une fuite dans un échangeur de chaleur du modérateur.

2.6.3 Circuit du gaz de couverture

10. Préciser quelle est la limite d'explosion inférieure de l'oxygène et du deutérium dans le gaz de couverture.
11. Expliquer comment chacun des facteurs suivants a une incidence sur la concentration de D_2 dans le gaz de couverture.
 - a) puissance du réacteur

- b) niveaux d'impuretés dans le modérateur
 - c) température du modérateur
 - d) pression du gaz de couverture
 - e) niveau du modérateur
 - f) concentration de D_2 dans le modérateur
12. Expliquer pourquoi le gaz de couverture doit circuler lorsque le réacteur est à l'arrêt.
 13. Donner trois circonstances qui nécessitent la purge du gaz de couverture du modérateur.
 14. Expliquer quelle mesure on doit prendre au moment de la purge du gaz de couverture.
 15. Nommer deux méthodes de surveillance des concentrations de D_2 , de O_2 et de N_2 dans le gaz de couverture.
 16. Expliquer les conséquences des concentrations élevées de N_2 et de D_2 dans le gaz de couverture.
 17. Les concentrations de D_2 se situant entre 2 % et 4 % dans le gaz de couverture exigent que le personnel de centrales intervienne. Nommer huit mesures de type courant que l'on peut prendre.
 18. Décrire les mesures qui seront prises par le personnel de salle de commandes lorsque les concentrations de D_2 dépassent 4 %.
 19. Expliquer deux méthodes visant à s'assurer que les systèmes de recombinaison fonctionnent correctement.

2.6.4 Addition d'un poison

20. Pour chacune des applications suivantes, expliquer pourquoi l'addition de poison pourrait être requise, le choix approprié de poison et la raison pour laquelle ce poison convient davantage dans les circonstances.
 - a) panne prolongée

- b) surchargement de combustible (commande par compensation de la réactivité)
 - c) avant le démarrage initial lorsque les tranches contiennent du combustible neuf
 - d) démarrage après une panne due au poison
 - e) forte augmentation de puissance suite à l'exploitation maintenue à faible puissance
21. Nommer quatre paramètres à surveiller lorsque l'opérateur de salle de commandes ajoute du poison manuellement.
 22. Comment peut-on s'assurer que la quantité adéquate de poison est ajoutée lorsque le réacteur est critique?
 23. Comment peut-on s'assurer que la quantité requise de poison est ajoutée durant une panne prolongée ou à l'état d'arrêt garanti?
 24. Pourquoi y a-t-il un dispositif d'addition automatique de gadolinium?
 25. Donner deux raisons pour lesquelles la non-disponibilité du poison est une question préoccupante?
 26. Quelle est la principale préoccupation de l'enlèvement de poison par inadvertance lors du démarrage?
 27. Nommer une préoccupation relative à l'enlèvement de poison par inadvertance pendant le fonctionnement à pleine puissance.
 28. Quelles sont les deux principales conséquences de l'utilisation de bore comme poison lorsqu'il faudrait plutôt ajouter du gadolinium?
 29. Nommer trois conséquences de l'addition de poison par inadvertance pendant le fonctionnement à pleine puissance du réacteur.

2.6.5 *Épuration du modérateur*

30. Nommer trois raisons pour lesquelles le modérateur doit être pur.
31. Nommer trois façons de maintenir la pureté du modérateur.
32. Comment contrôle-t-on le taux d'enlèvement du gadolinium?
33. Pourquoi a-t-on recours à une technique en plusieurs étapes pour l'enlèvement du bore?
34. Pourquoi le bore ou le gadolinium doivent-ils être enlevés lorsque leurs effets de réactivité ne sont plus requis?
35. Comment maintient-on le débit d'épuration?
36. Quelles sont les deux conséquences d'un débit d'épuration élevé?
37. Quelle est la conséquence d'un débit d'épuration faible?
38. Comment maintient-on la température d'entrée de l'échange d'ions?
39. Quelles sont les trois conséquences d'une température élevée à l'entrée du circuit d'épuration?
40. Quelle est la conséquence d'une pression différentielle élevée de part et d'autre d'un composant du circuit d'épuration?
41. Comment maintient-on une faible conductivité?
42. Quelle est la conséquence de l'utilisation continue de résine épuisée pour l'épuration?
43. Comment le personnel de commande détermine-t-il si une colonne échangeuse d'ions saturée de bore a été insérée par inadvertance?

44. Quelle est la conséquence de la présence d'une résine qui s'est échappée dans le circuit principal du modérateur?
45. Pourquoi l'épuration du modérateur doit-elle être isolée pendant l'état d'arrêt garanti en cas de surempoisonnement?

3 Circuit caloporteur

3.1 Sources de chaleur du CC et trajets de transfert de chaleur

Le but principal du circuit caloporteur (CC) est de transporter la chaleur produite dans le processus de fission vers les générateurs de vapeur à l'aide de D₂O pressurisé. Trois grands types de circuits caloporteurs sont utilisés actuellement dans les réacteurs CANDU. Ce sont :

1. boucle double, avec contre-courant traversant le réacteur et contrôle de la pression par alimentation et purge;
2. boucle double, avec contre-courant traversant le réacteur, et contrôle de la pression à l'aide d'un pressuriseur;
3. boucle simple, avec contre-courant traversant le réacteur et contrôle de la pression à l'aide d'un pressuriseur.

Une fonction additionnelle du circuit caloporteur (CC) est de constituer une barrière contre le rejet de radioactivité dans l'environnement. Dans le réacteur, des tubes de force en alliage de zirconium sont utilisés, alors que le reste du circuit est essentiellement constitué d'acier au carbone.

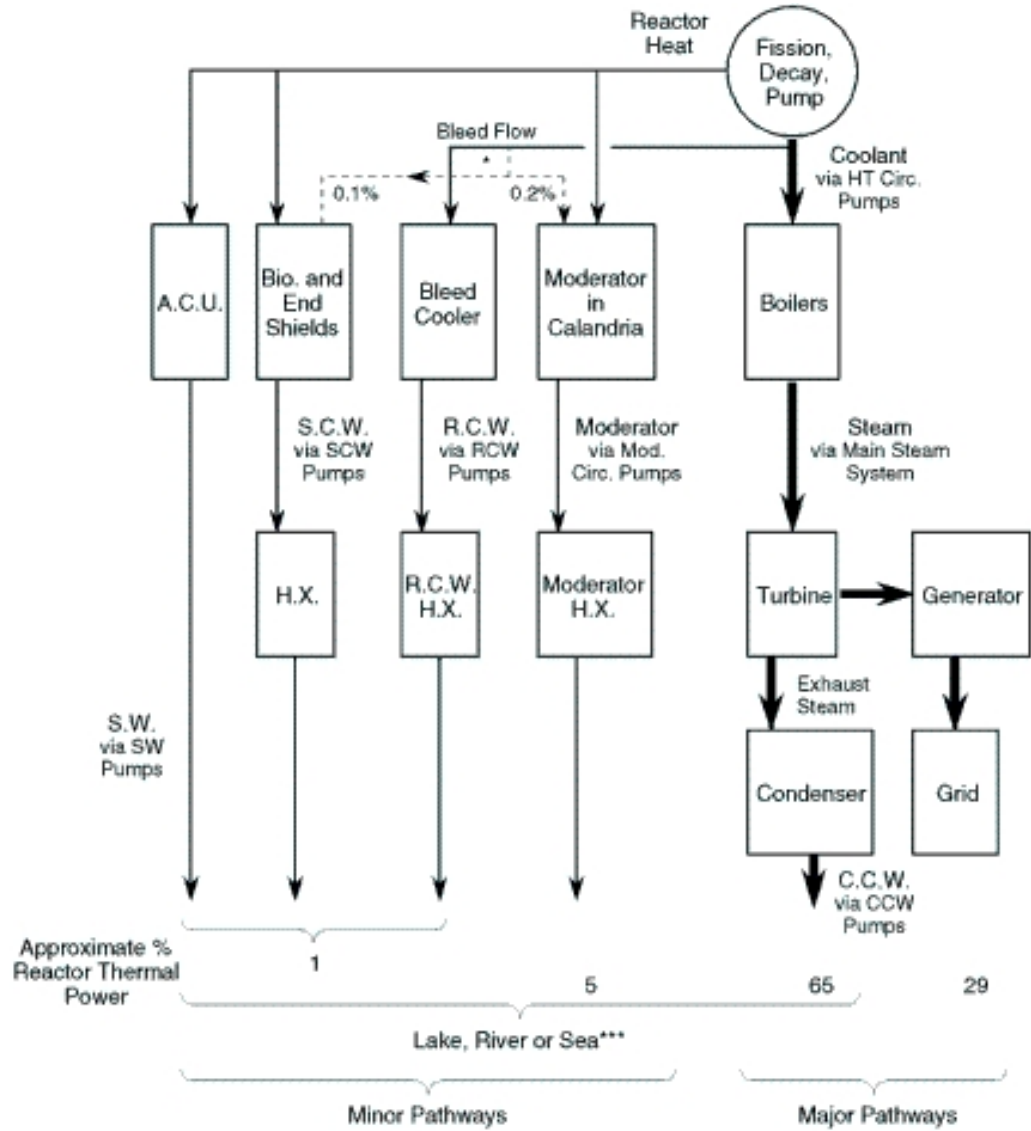
Le CC doit avoir la capacité d'enlever à la fois la chaleur due à la pleine puissance du réacteur et la chaleur de désintégration suite à une mise à l'arrêt. Dans la présente section, nous allons décrire les trajets du CC permettant d'éliminer la chaleur due à la pleine puissance du réacteur ainsi que la chaleur produite par les tranches lorsqu'elles sont en mode d'évitement de l'empoisonnement. La fonction opérationnelle de mise à l'arrêt sera examinée dans un autre module.

3.1.1 Fonctionnement du réacteur à pleine puissance

La répartition approximative de la chaleur produite dans un réacteur CANDU à pleine puissance est la suivante :

- Chaleur issue du processus de fission ~ 92 à 93 %
- Chaleur produite par la désintégration des produits de fission ~ 6 à 7 %
- Chaleur produite par les pompes du CC ~ 1 %

À pleine puissance, la chaleur provenant des sources précitées est transportée par le caloporteur du CC (D₂O) vers les générateurs de vapeur où l'inventaire d'eau d'alimentation, une fois converti en vapeur, constituera la principale source froide intermédiaire (figure 3.1)



Key	
A.C.U.	Air Cooling Unit
S.W.	Service Water
S.C.W.	Shielding Cooling Water
R.C.W.	Recirculated Cooling Water
C.C.W.	Condenser Cooling Water

* Some channel heat will be transferred to the moderator and end shields by conduction and radiation

*** An additional heat exchange is required for cooling to the sea, i.e. Recirculated Cooling Water to Raw Sea Water

Figure 3.1
Chaînes d'évacuation de la chaleur à pleine puissance – Grands trajets et trajets peu importants

A.C.U.	URA
Bio. and End Shields	Boucliers d'extrémité et blindages biologiques
Bleed Flow	Débit de purge
0.1%	0,1 %
0.2%	0,2 %
Reactor Heat	Chaleur du réacteur
Fission, Decay, Pump	Fission, désintégration, pompe
Coolant via HT Circ. Pumps	Caloporteur circulant dans les pompes du CC
Bleed Cooler	Refroidisseur de purge
Moderator in Calandria	Modérateur dans la calandre
Boilers	Générateurs de vapeur
S.C.W. via SCW Pumps	ERB par les pompes ERB
R.C.W. via RCW Pumps	ERR par les pompes ERR
Moderator via Mod. Circ. Pumps	Modérateur circulant dans les pompes du modérateur
Steam via Main Steam System	Vapeur dans le circuit principal
H.X.	Échangeur de chaleur
R.C.W. H.X.	Échangeur de chaleur de l'ERR
Moderator H.X.	Échangeur de chaleur du modérateur
Turbine	Turbine
Generator	Génératrice
Exhaust Steam	Valeur rejetée
S.W. via SW Pumps	EP par les pompes EP
Condenser	Condenseur
Grid	Réseau
C.C.W. via CCW pumps	ERC par les pompes ERC
Approximate % Reactor Thermal Power	Puissance thermique approximative du réacteur (%)
Lake, River or Sea***	Lac, rivière ou mer***
Minor Pathways	Trajets peu importants
Major Pathways	Grands trajets

Acronymes	
URA	Unité de refroidissement de l'air
ES	Eau de service
ERB	Eau de refroidissement du blindage
ERR	Eau de refroidissement recirculée
ERC	Eau de refroidissement du condenseur

* Une partie de la chaleur des canaux sera transférée au modérateur et aux boucliers d'extrémité par conduction et rayonnement.

*** Un échange de chaleur additionnelle est requis pour le refroidissement de l'eau vers la mer, c.-à-d. l'eau de refroidissement recirculée vers l'eau de mer.

La vapeur produite dans les générateurs de vapeur fournit la force motrice au groupe turbo-alternateur. Environ 30 % de l'énergie produite par les générateurs de vapeur sera convertie en énergie électrique pour le réseau pendant l'exploitation normale. Les autres 70 % de l'énergie thermique de la vapeur seront transférés par le condenseur et l'eau de refroidissement du condenseur (ERC) vers un lac, une rivière ou la mer. Cette énergie (chaleur) est rejetée sous forme de vapeur par la turbine et est reconvertie à l'état liquide.

Il existe également d'autres trajets pour différents systèmes auxiliaires, qui mènent tous ultimement au lac (ou à la rivière ou à la mer). Tel qu'indiqué à la figure 3.2, la majorité de ces trajets n'évacuent pas une grande quantité de chaleur (trajets peu importants). Le seul système auxiliaire qui nécessite un trajet d'évacuation de la chaleur important est celui du modérateur, qui représente environ 5 % de la puissance de sortie du réacteur. Il convient de noter que cette chaleur est générée par la combinaison de neutrons thermalisés et de rayons gamma absorbants issus de la fission, des produits de fission et des composants du cœur devenus radioactifs.

À noter que ces trajets d'évacuation de la chaleur peu importants ne seront pas indiqués dans les diagrammes suivants, à moins que l'on suppose qu'ils soient disponibles pour évacuer la chaleur à moins d'indication contraire.

Les différents systèmes de blindage à différents endroits (boucliers d'extrémité et blindage biologiques/thermiques) ont été regroupés dans une même catégorie.

La circulation des différents milieux de transport, comme l'ERC (eau de refroidissement du condenseur), l'ERR (eau de refroidissement recirculée), etc., exige le fonctionnement des pompes de circulation pour que le mécanisme de caloportage global demeure viable. Les diagrammes de transfert de chaleur illustrés dans ce module et dans les modules subséquents, supposent que le fonctionnement des différentes pompes est correct (normal).

3.1.2 Évitement de l'empoisonnement

Ce mode de fonctionnement est particulièrement utile lorsque le débit de vapeur vers la turbine est perdu lorsque le réacteur est en régime de puissance (p. ex. en cas d'arrêt de la turbine ou de la génératrice), et que l'on s'attend à ramener en service le groupe turbo-alternateur dans les heures qui suivent. Au lieu de procéder à une panne prévue dans une tranche, on peut avoir recours à ce mode pour éviter que le

réacteur ne s'empoisonne en raison des niveaux de xénon élevés plus que la normale.

La vapeur doit être évacuée ailleurs afin de maintenir la sortie de chaleur du générateur de vapeur égale à l'entrée de chaleur en provenance du caloporteur (fig. 3.2). Dans certaines centrales, la vapeur est évacuée vers l'atmosphère au moyen de vannes de rejet de vapeur (VRV); à d'autres endroits, la vapeur est déchargée directement vers le condenseur à l'aide de vannes de décharge de vapeur du condenseur (VDVC). Les VRV ont une capacité nominale de 100 % de la pleine puissance et les VDVC ont une capacité nominale entre 75 et 100 % de la pleine puissance. Une partie de l'écoulement de vapeur est dirigée vers le dégazeur afin de maintenir la pression du dégazeur et la température de l'eau d'alimentation en remplaçant la vapeur d'extraction utilisée habituellement.

Idéalement, la puissance du réacteur pourrait être maintenue à la pleine puissance afin de s'assurer qu'aucune panne due à l'empoisonnement ne se produise. Dans la pratique, la puissance du réacteur et, par conséquent, l'écoulement de vapeur, sont maintenus au minimum – environ 60 % à 70 % - taux auquel le transitoire de xénon peut être dépassé à l'aide des dispositifs de réglage de la réactivité, au besoin. Les raisons de ce fonctionnement à puissance réduite sont les suivantes :

1. Dans les centrales utilisant des VRV : pour conserver l'eau d'alimentation, qui est perdue dans l'atmosphère.
2. Dans les centrales utilisant des VDVC et possédant des condenseurs dont la capacité thermique est limitée : pour éviter de surcharger le condenseur et de provoquer des vibrations de conduite excessive (à noter que dans certaines centrales, on trouve des condenseurs dont la capacité est de 100 % à la pleine puissance).
3. Des économies d'énergie seront réalisées en raison des coûts moins élevés en combustibles et en chargements de combustibles.

La figure 3.2 a) illustre la chaîne de transfert de chaleur de l'évitement d'un empoisonnement pour les centrales qui utilisent des VRV. Le caloporteur transporte le combustible et la chaleur de la pompe vers le générateur de vapeur, et la vapeur transporte la chaleur provenant du générateur de vapeur vers l'atmosphère par le biais des VRV.

La figure 3.2 b) illustre le processus correspondant dans d'autres centrales. La vapeur transporte la chaleur issue des générateurs de vapeur vers le condenseur par le biais des VDVC et l'ERC transporte la chaleur des condenseurs vers un lac, une rivière ou la mer, selon l'emplacement de la centrale.

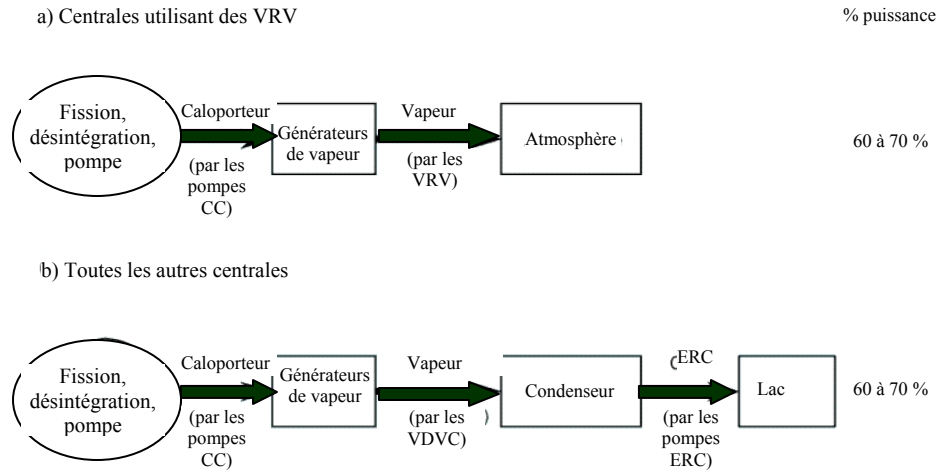


Figure 3.2
Chaîne d'évacuation de la chaleur en mode d'évitement de l'empoisonnement

3.1.3 Fissuration par hydruration retardée

Le changement entre les états de fonctionnement du réacteur est contrôlé de manière attentive et est détaillé dans les différents manuels d'exploitation des centrales. L'une des contraintes générales imposées aux changements entre les états de fonctionnement du circuit caloporteur est la fissuration par hydruration retardée (FHR).

Dans ce cours, nous allons examiner les méthodes générales adoptées pour réduire au minimum la FHR dans les tubes de force. L'expérience démontre que le problème est essentiellement un problème de température et de contrainte. Le risque le plus élevé est présent lorsque les températures dans le CC se situent dans la plage de ~100 à 200 °C. Les procédures d'exploitation, par conséquent, sont conçues pour éviter le fonctionnement dans cette plage et également pour traverser cette plage de température le plus rapidement possible (et de manière continue) durant le réchauffement et le refroidissement de la tranche. Pour limiter les niveaux de contrainte davantage, cette transition peut également se faire à des pressions inférieures à la pression d'exploitation normale.

3.1.4 Dangers

Le circuit caloporteur fonctionne habituellement à température et pression élevées et, par conséquent, comporte tous les dangers classiques dus à ces effets.

De plus, il y a des dangers d'irradiation associés au fonctionnement du réacteur. Ceux-ci comprennent la présence de produits radioactifs et de produits de fission. Ces matériaux sont distribués dans le circuit et causent les effets suivants :

- a) la présence de D₂O contaminé renfermant :
 - i) du tritium
 - ii) des produits de fission résultant de la défaillance du combustible ou de l'uranium piégé dans les grappes de combustible (à cause des procédés de fabrication);
 - iii) des produits d'activation.
- b) des surfaces contaminées dues à :
 - i) le dépôt des produits d'activation;
 - ii) le dépôt d'impuretés;
 - iii) la collecte dans les colonnes échangeuses d'ions et les filtres.

Le D₂O contaminé présente un danger important lorsqu'il y a des fuites ou des déversements, lorsque le circuit est ouvert ou lorsque l'on ajoute ou que l'on enlève du caloporteur.

Les surfaces contaminées sont dangereuses lorsque l'on travaille dans un circuit ouvert et drainé, ou lors de l'entretien des composants.

En outre, en régime de puissance, il y a un risque de champ gamma et de champ de neutrons élevés autour des composants du circuit (en raison de la présence de N¹⁶ et de O¹⁹).

3.1.5 Dangers causés par l'hydrogène lorsque le circuit est froid

L'addition nécessaire d'hydrogène gazeux au circuit pendant le fonctionnement peut entraîner deux problèmes importants lorsque le circuit est froid et dépressurisé :

- a) fragilisation par l'hydrogène des composants en alliage de zirconium.
- b) danger d'explosion associé à l'hydrogène, car l'hydrogène sort de solution suite à la dépressurisation du circuit. Cela constitue une préoccupation particulière si le circuit est ouvert pour effectuer des réparations. C'est pourquoi le système d'addition d'hydrogène est isolé avant que la tranche ne soit dépressurisée lors de la mise à l'arrêt. Il pourrait être nécessaire d'effectuer une purge particulièrement lorsque des opérations de soudure sont effectuées.

Ces deux problèmes exigent que les additions de H₂ au CC se limitent au niveau requis afin de maintenir les spécifications du circuit.

3.1.6 Notions principales

- Les deux grands trajets d'évacuation de la chaleur à pleine puissance sont la sortie de puissance vers le réseau et le rejet de chaleur vers un lac (une rivière ou la mer).
- Dans le cas de l'opération d'évitement de l'empoisonnement, le trajet d'évacuation de la chaleur principale se fait par le rejet de vapeur directement au condenseur ou dans l'atmosphère.
- La méthode opérationnelle générale pour éviter la FHR (fissuration par hydruration retardée) dans les composants des tubes de force consiste à éviter de faire fonctionner le CC dans la plage de température se situant entre 100 °C et 200 °C et de traverser cette plage rapidement et de manière continue lorsque la situation se présente.
- Le CC présente des dangers potentiels associés à des sources classiques et des sources radiologiques.
- Le H₂ augmente le risque de fragilisation par l'hydrogène des composants en alliage de zirconium lorsque le CC est froid, et il présente un danger d'explosion lorsqu'il sort de solutions quand le CC est froid et dépressurisé.

3.2 Contrôle de la pression et de l'inventaire dans le CC

Le rôle premier du circuit caloporteur (CC) est de transporter la chaleur générée par la fission et la désintégration en provenance du

réacteur vers les générateurs de vapeur, ce qui produit de la vapeur actionnant le groupe turbo-alternateur.

La turbine doit utiliser une vapeur saturée à une pression d'environ 4,5 MPa. Si le circuit caloporteur demeure sous-refroidi, c.-à-d. qu'il demeure liquide, cela signifie que le CC doit également être un circuit pressurisé. En outre, compte tenu de la ΔT requise pour transférer la chaleur du circuit caloporteur vers les générateurs de vapeur, le CC doit être pressurisé à environ 9 à 10 MPa.

Ces pressions élevées font en sorte qu'il est nécessaire de respecter les exigences relatives au fonctionnement du système de contrôle de la pression à la fois sur le plan mécanique et nucléaire.

3.2.1 Contrôle de la pression

Préoccupations d'ordre mécanique

Le circuit caloporteur est une limite de pression et doit demeurer intact. Le fonctionnement à des pressions plus élevées que la normale dans le circuit caloporteur augmente le risque de rupture du CC et, par conséquent, d'APRP (accident dû à la perte de réfrigérant primaire). Un APRP se produit lorsqu'il y a perte d'inventaire de caloporteur, ce qui risque également de rendre la quantité de caloporteur insuffisante pour refroidir le combustible.

Préoccupations d'ordre nucléaire

Par ailleurs, l'exploitation avec une pression trop faible dans le circuit risque de mener à une ébullition excessive. Cela conduirait inévitablement à la surchauffe du combustible, soit par une conséquence directe de l'ébullition du film (assèchement) ou suite à la perte de l'écoulement du caloporteur dans les canaux, à cause de la cavitation d'une pompe. En outre, en raison du coefficient de vide positif, le vidage des canaux mène à une augmentation importante de la puissance de sortie du réacteur, ce qui tend à augmenter l'ébullition et la surchauffe du combustible si aucune mesure de protection n'est prise. À noter que l'ébullition excessive, pouvant donner lieu à la surchauffe du combustible et au vidage des canaux, peut également se produire à des pressions de circuit normales lorsque des passages laissant place au caloporteur sont bloqués ou restreints.

À noter que l'exigence qui consiste à éviter l'ébullition excessive permet également au CC, dans la plupart des centrales, d'être exploité à puissance élevée avec une ébullition limitée (ébullition nucléée) à la sortie de certains canaux. Habituellement, dans un certain nombre de

canaux, on observe une ébullition de 3 à 5 %. Cette ébullition améliore le transfert de chaleur en provenance du combustible et constitue une chaleur additionnelle disponible pour les générateurs de vapeur.

Même dans les centrales où une ébullition limitée se produit à pleine puissance, l'ébullition prend fin lorsque la puissance du réacteur devient ~ 90 % PP.

Dans un circuit caloporteur totalement fermé, la pression varie directement en fonction de la température moyenne du CC. La pression du caloporteur augmente en raison du gonflement à mesure que la température moyenne diminue pendant les augmentations de puissance du réacteur. De même, la pression diminue par suite du retrait du caloporteur pendant les réductions de puissance.

Le retrait et le gonflement du caloporteur constitue un phénomène important. Le gonflement du CC dans un réacteur de type courant peut atteindre 60 m^3 lors du réchauffement en plus de 10 à 20 m^3 lorsque la puissance passe de 0 à 100 % de la pleine puissance. Étant donné la nature incompressible du caloporteur, l'addition d'un volume aussi faible que 1 m^3 de caloporteur à un circuit caloporteur pressurisé sans ébullition augmenterait considérablement la pression.

Ces conditions font en sorte que l'on doit disposer d'un système de contrôle de la pression et de l'inventaire dans le CC. Ce système permettra de s'assurer que la quantité adéquate de caloporteur dans des conditions convenables permet d'éliminer la chaleur provenant du combustible.

3.2.2 Contrôle de la pression dans le circuit caloporteur

Dans le module précédent, nous avons vu les états opérationnels normaux du CC. On se rappellera qu'il est nécessaire que la pression dans le CC soit contrôlée à tous les niveaux de puissance – de l'état d'arrêt froid à 100 % de la pleine puissance.

Dans ce module, nous avons déjà mentionné que le volume de l'inventaire de D_2O change, alors que la tranche passe de la puissance zéro froide à 100 % de la pleine puissance chaude et vice versa. On a également précisé que le changement d'inventaire important se produit lors du réchauffement du réacteur jusqu'à environ $250 \text{ }^\circ\text{C}$ (environ le triple du changement qui se produit entre 0 % et 100 % PP).

C'est la raison pour laquelle deux méthodes de contrôle de la pression sont requises dans la plupart des réacteurs CANDU, selon le niveau de puissance du réacteur. Ces deux méthodes de contrôle de la pression

sont connues sous le nom de fonctionnement en mode solide et fonctionnement en mode normal.

Contrôle de la pression en mode solide

Le mode solide décrit le contrôle de la pression dans le CC lorsque le pressuriseur est isolé (dans les centrales utilisant des pressuriseurs). Dans ce mode, le contrôle de la pression est assuré par l'alimentation et la purge, c.-à-d. par addition et enlèvement d'inventaire. La signification du mode solide est qu'il n'y a pas d'espace vapeur compressible dans le circuit pouvant atténuer les transitoires de pression (le circuit est totalement exempt d'ébullition et le pressuriseur est isolé).

Lorsque la pression du CC est à sa valeur seuil, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à des mesures d'alimentation ou de purge. Si la pression dépasse la valeur seuil, une purge permettra d'éliminer l'inventaire du CC et de faire baisser la pression. Si la pression descend sous la valeur seuil, c'est le contraire qui se produit, c.-à-d. que la vanne d'alimentation s'ouvre et que de l'inventaire est ajouté au CC (se reporter à la figure 3.3 pour un schéma simplifié du contrôleur d'alimentation et de purge).

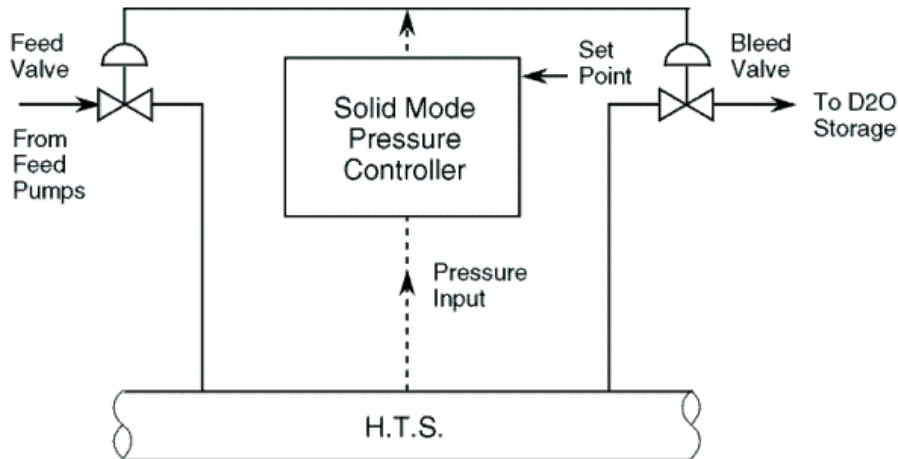


Figure 3.3
Contrôleur d'alimentation et de purge simplifié

Feed Valve	Vanne d'alimentation
From Feed Pumps	En provenance des pompes d'alimentation
Solid Mode Pressure Controller	Contrôleur de pression en mode solide
Set Point	Valeur seuil
Bleed Valve	Vanne de purge

To D2O Storage	Vers le stockage du D ₂ O
Pressure Input	Pression d'admission
H.T.S.	CC

À noter que durant le réchauffement de la tranche, la vanne de pression sera soit entièrement ouverte ou proche de cet état afin d'éliminer le gonflement du D₂O hors du CC. Lors du refroidissement de la tranche, c'est le contraire qui se produit, c.-à-d. que la vanne d'alimentation sera entièrement ouverte.

Dans la pratique, il est souhaitable qu'un pourcentage du D₂O du CC circule dans le circuit d'épuration afin d'éliminer les impuretés, les produits de fission, etc. La vanne de purge est ouverte légèrement pour ce faire (sauf dans les CANDU 600, dont il sera question plus loin dans ce module). Il s'ensuivra une baisse de la pression du circuit, de sorte que le contrôleur ouvrira la vanne d'alimentation afin de maintenir la pression du circuit à la valeur seuil.

Pendant le fonctionnement en mode solide, le circuit d'alimentation et de purge, en plus de ce qui précède, accomplit les tâches suivantes :

- a) il fournit du D₂O au circuit de refroidissement du joint d'étanchéité de pompe;
- b) le condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur dans certaines centrales) accepte la décharge de caloporteur provenant du CC (vannes de purge, vannes de décharge du CC, vannes de purge de vapeur, vannes de décharge du pressuriseur selon les centrales). Cela permet de s'assurer que le caloporteur est disponible au besoin.

Pendant le fonctionnement en mode solide, le pressuriseur est isolé du CC grâce à une vanne motorisée. Dans ce cas, les conditions de saturation sont fixées dans le pressuriseur à la pression d'exploitation normale grâce à des radiateurs électriques et des vannes de purge de vapeur (destinés ultérieurement au circuit caloporteur).

Contrôle de la pression en mode normal

Le contrôle en mode normal est choisi durant le fonctionnement normal. Dans ce mode, le pressuriseur n'est plus isolé et il contrôle la pression dans le CC (on l'appelle parfois bêche de détente).

Le pressuriseur illustré à la figure 3.4 est raccordé au CC, au collecteur de sortie du réacteur, à l'aide d'une conduite de grand diamètre.

La pression de vapeur dans l'espace au-dessus du liquide est réglé afin de contrôler la pression dans le circuit caloporteur.

Pour augmenter la pression dans le circuit caloporteur, la pression de vapeur doit être augmentée. Pour ce faire, on utilise des réchauffeurs électriques, ce qui augmente la température de l'eau dans le pressuriseur. Cela entraîne une augmentation de la température et de la pression de saturation.

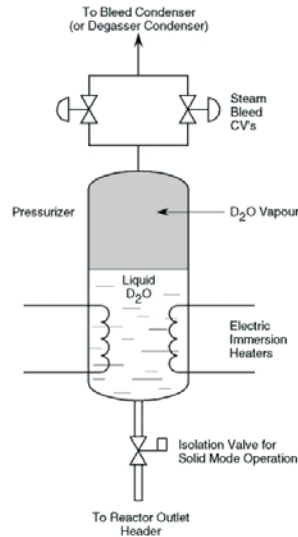


Figure 3.4 – Pressuriseur de type courant

To Bleed Condenser (or Degasser Condenser)	Vers le condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur)
Steam Bleed CV's	Vannes de réglage (VR)
Pressurizer	Pressuriseur
D ₂ O Vapour	D ₂ O (vapeur)
Liquid D ₂ O	D ₂ O (liquide)
Electric Immersion Heaters	Thermoplongeurs électriques
Isolation Valve for Solid Mode Operation	Vanne d'isolement pour le fonctionnement en mode solide
To Reactor Outlet Header	Vers le collecteur de sortie du réacteur

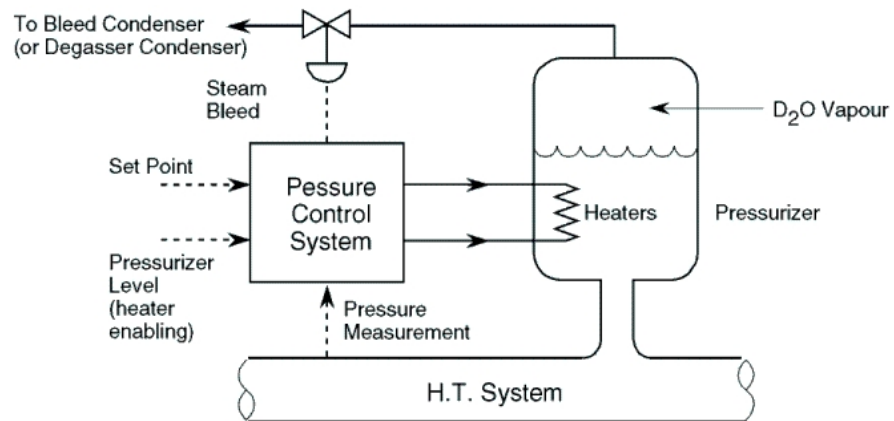


Figure 3.5
Contrôle de la pression dans le CC (en mode normal)

To Bleed Condenser (or Degasser Condenser)	Vers le condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur)
Steam Bleed	Purge de vapeur
Set Point	Valeur seuil
Pressure Control System	Système de contrôle de la pression
Heaters	Réchauffeurs
D ₂ O Vapour	D ₂ O (vapeur)
Pressurizer	Pressuriseur
Pressurizer Level (heater enabling)	Niveau du pressuriseur (permettant le fonctionnement des réchauffeurs)
Pressure Measurement	Mesure de la pression
H.T. System	Circuit caloporteur

Afin de réduire la pression dans le CC, de la vapeur est déchargée du pressuriseur vers le condenseur de purge (ou le condenseur du dégazeur dans certaines centrales) grâce à des vannes de purge de vapeur. Cela entraîne la diminution de la température et de la pression de saturation. Le système de contrôle est illustré à la figure 3.5.

Pendant le fonctionnement en mode normal, le circuit d'alimentation et de purge ne contrôle pas la pression dans le CC, mais accomplit les fonctions suivantes.

- a) Il ajuste l'inventaire de caloporteur afin de maintenir le niveau de D₂O pressurisé à sa valeur seuil (voir section suivante sur le contrôle du niveau);
- b) il ramène le D₂O vers le circuit (par des conduites d'alimentation) afin de compenser les pertes des vannes de purge de vapeur (ou de l'écoulement du dégazeur dans certaines centrales);

- c) il fournit du D₂O froid au circuit d'épuration dans la plupart des centrales;
- d) il fournit du D₂O à la pompe du système du joint d'étanchéité de pompe;
- e) le condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur dans certaines centrales) accepte la décharge de caloporteur provenant du CC (vannes de purge, vannes de décharge du CC, vannes de purge de vapeur, vannes de décharge du pressuriseur, selon les centrales). Ainsi, on peut s'assurer que le caloporteur est disponible au besoin.

À noter que les fonctions c), d) et e) sont accomplies par le circuit d'alimentation et de purge en mode de contrôle.

L'un des principaux avantages du contrôle du pressuriseur est qu'il permet de contrôler plus rapidement les transitoires de pression du CC que le circuit d'alimentation et de purge (c.-à-d. que de plus grandes quantités de caloporteur peuvent être transférées rapidement au pressuriseur ou en provenance de ce dernier par le raccord de grands diamètres vers le CC. En comparaison, un circuit d'alimentation et de purge aurait une capacité plus limitée).

Contrôle total de la pression par alimentation et purge

Dans certaines centrales, le CC est sans ébullition et en mode solide. Le contrôle de la pression dans ces cas, à tous les états de fonctionnement, est assuré par l'alimentation et la purge (c.-à-d. transfert d'inventaire). De façon générale, il s'agit du même contrôle en mode solide que dans les autres centrales. Le circuit d'alimentation et de purge permet également d'approvisionner les machines de chargement de combustible en D₂O.

Cependant, dans ce cas, la fonction de contrôle de la pression est divisée en deux plages, soit la plage étendue et la plage étroite.

La plage étendue couvre le réchauffement et le refroidissement du circuit lorsque la pression passe de la pression de fonctionnement maximale à une pression beaucoup plus faible, c.-à-d. qu'il s'agit d'un contrôle à faible gain, donnant lieu à un contrôle brut – plage étendue.

Dans le cas de l'exploitation à pleine puissance normale, lorsqu'un contrôle serré près de la valeur seuil est requis, le contrôle passe à un mode en un gain plus élevé, ce qui donne lieu à un réglage plus fin du contrôle – plage étroite. De plus amples détails sur le système de

contrôle seront présentés dans les cours sur les instruments et le contrôle.

Notions principales

- Lorsque la pression dans le CC est trop élevée, il peut y avoir rupture (APRP). Lorsque la pression dans le CC est faible, il peut y avoir surchauffe du combustible à cause de l'ébullition pelliculaire, ou perte de circulation du caloporteur à cause de la cavitation de pompe. Le vidage favorisera la surchauffe du combustible parce qu'il introduit une réactivité positive, ce qui augmente la production de chaleur dans le combustible.
- La surchauffe du combustible due à l'ébullition pelliculaire est également possible à la pression maximale du circuit lorsqu'il y a blocage ou restriction du caloporteur.
- Le contrôle de la pression est requis parce que la pression dans le CC varie directement en fonction de la température moyenne du CC. Le contrôle de l'inventaire est requis parce que le retrait et le gonflement dépendent de la variation de température dans le CC.
- Dans le cas des réacteurs dotés de pressuriseurs, le circuit d'alimentation et de purge contrôle la pression CC en mode solide. Il assure également le débit d'épuration (dans la plupart des centrales) et la présence de D₂O vers la garniture de pompe CC. Le condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur dans certaines centrales) accueille le D₂O provenant des vannes de décharge du CC afin d'éviter la perte de caloporteur.
- Dans le cas des réacteurs dotés de pressuriseurs, le circuit d'alimentation et de purge contrôle le niveau du pressuriseur en mode normal. Il fournit également une alimentation d'appoint en cas de perte, et assure le débit d'épuration (dans la plupart des centrales), et la présence de D₂O vers les garnitures de pompe du CC, et maintient le condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur dans certaines centrales) comme cuve de décharge de pression.
- Dans le cas des réacteurs sans pressuriseur, le circuit d'alimentation et de purge contrôle la pression dans le CC. Il accomplit essentiellement les mêmes fonctions qu'en mode solide dans les réacteurs dotés de pressuriseurs. Il peut

également alimenter en D₂O les machines de chargement du combustible.

3.2.3 Contrôle du niveau du pressuriseur

Le contrôle du niveau de D₂O dans le pressuriseur est important pour les raisons suivantes :

- a) il permet d'éviter l'exposition à l'air libre des réchauffeurs électriques (à faible niveau), ce qui réduit par conséquent le risque de brûler les éléments (qui se ferment automatiquement lorsque le niveau est bas). Cela donne lieu à la perte de contrôle de pression (c.-à-d. que l'on ne peut augmenter la pression sans les réchauffeurs);
- b) il permet d'éviter que le circuit devienne solide en raison d'un niveau trop élevé. La perte d'espace vapeur donne lieu à la perte de contrôle de la pression;
- c) le fait de tenir compte des limites imposées par a) et b) permet de maintenir l'inventaire maximal dans le CC.

Une fonction additionnelle du contrôleur de niveau consiste à augmenter le niveau dans le pressuriseur à mesure que la puissance du réacteur augmente. Cela signifie qu'il y a retrait ou gonflement par suite des manœuvres de puissance et qu'il faut procéder au transfert directement vers le pressuriseur ou en provenance de ce dernier avec un minimum recours à l'alimentation et à la purge. Le système de contrôle simplifié est illustré à la figure 3.6.

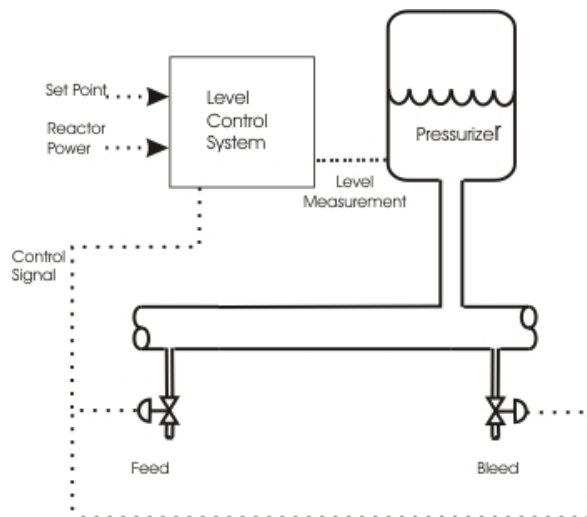


Figure 3.6
Contrôle du niveau du pressuriseur

Set Point	Valeur seuil
Reactor Power	Puissance du réacteur
Control Signal	Signal de contrôle
Level Control System	Système de contrôle de niveau
Pressurizer	Pressuriseur
Level Measurement	Mesure du niveau
Feed	Alimentation
Seed	Purge

Tout comme les changements de niveau dans les générateurs de vapeur en fonction de la puissance du réacteur, le niveau est au plus bas lorsque la puissance est faible. Cela s'explique par le fait que l'inventaire du CC gonflera à mesure que la puissance du réacteur augmentera. Le faible niveau laisse de la place pour le caloporteur en excès qui pénétrera dans le pressuriseur. Il faut généralement compenser le retrait lorsque le réacteur fonctionne à faible puissance, mais un niveau plus bas ne constitue pas une préoccupation importante en ce qui a trait à l'exploitation. Par ailleurs, le niveau est à son plus haut à la pleine puissance. Cela tient compte du retrait qui risque de se produire si la puissance diminue. Lorsque le réacteur fonctionne à pleine puissance, le risque de gonflement additionnel est minimal; par conséquent, le niveau plus élevé dans le pressuriseur ne constitue pas une préoccupation importante en ce qui a trait à l'exploitation.

Le niveau du pressuriseur est contrôlé à l'aide de vannes d'alimentation et de purge.

Par exemple, lors d'un accroissement de puissance, la valeur seuil du niveau du pressuriseur sera augmentée. Le gonflement, par suite de l'accroissement de puissance, se répercutera dans le pressuriseur et fera augmenter le niveau. L'action du circuit d'alimentation et de purge sera réduit au minimum afin d'ajuster l'inventaire dans le CC. Le contraire est vrai également pour une diminution de la puissance du réacteur. Le retrait dans le CC sera assuré par le pressuriseur.

Un autre avantage, qui consiste à augmenter par palier le niveau du pressuriseur à mesure que la puissance augmente, est que, en cas d'arrêt du réacteur, le retrait résultant dans le CC sera compensé rapidement par le pressuriseur. À noter qu'il ne convient pas de se fier entièrement au pressuriseur pour compenser le gonflement de la puissance zéro froide à 100 % de la pleine puissance chaude. Cependant, le pressuriseur compensera les changements d'inventaire qui se produisent en régime de puissance (de la puissance zéro chaude

à la pleine puissance), avec un minimum d'interventions de l'alimentation et de la purge. Le transfert d'inventaire entre la puissance pressurisée froide et la puissance zéro chaude, afin de compenser le retrait et le gonflement, se fait par le circuit d'alimentation et de purge et l'inventaire du réservoir de stockage de D₂O.

Un autre avantage de l'utilisation d'un pressuriseur est qu'il permet d'ajouter/d'enlever de l'inventaire dans le CC à sa température de fonctionnement directement pendant les transitoires. Cela réduit au minimum les pertes de chaleur et les contraintes thermiques comparativement à un système solide (c.-à-d. que l'inventaire est refroidi à mesure qu'il quitte le circuit et qu'il est réchauffé lorsqu'il retourne au circuit par le trajet d'alimentation et de purge).

3.2.4 Réponse de l'alimentation et de la purge aux changements de puissance

Pour un contrôle précis à l'aide de l'alimentation et de la purge, et lorsque l'on travaille à des pressions élevées dans le CC, des vannes dont la taille est relativement petite sont utilisées. Les taux de transfert d'inventaire, et par conséquent le contrôle des transitoires de pression sont limités.

Dans les centrales qui ne comportent pas de pressuriseurs, le recours aux techniques suivantes permet de ménager le circuit d'alimentation et de purge :

- a) exploiter la centrale (pendant la plus longue durée possible) comme une unité de charge de base, ce qui permet de réduire les manœuvres de puissance et les changements résultant dans la température du CC, et par conséquent les changements de pression.
- b) le maintien de la température moyenne du CC constante en régime de puissance. On y parvient en diminuant la pression des générateurs de vapeur, de même que leur température, à mesure que la puissance du réacteur augmente. La température des générateurs de vapeur et la température d'admission dans le réacteur sont présumées égales, étant donné qu'il suffirait d'un très petit ΔT entre la température du D₂O dans le CC à la sortie de générateur de vapeur et la température du générateur. Ainsi, à mesure que la température de sortie du réacteur augmente (en fonction d'une augmentation de la puissance du réacteur), la

température d'admission dans le réacteur dans les mêmes conditions diminuera. La température moyenne dans le CC, c.-à-d. les températures moyennes d'entrée et de sortie, demeureront essentiellement constantes dans toute la plage de puissance. Le retrait et le gonflement du circuit, et par conséquent les exigences relatives à l'alimentation et à la purge, seront ainsi réduites au minimum. Ce phénomène est illustré à la figure 3.7.

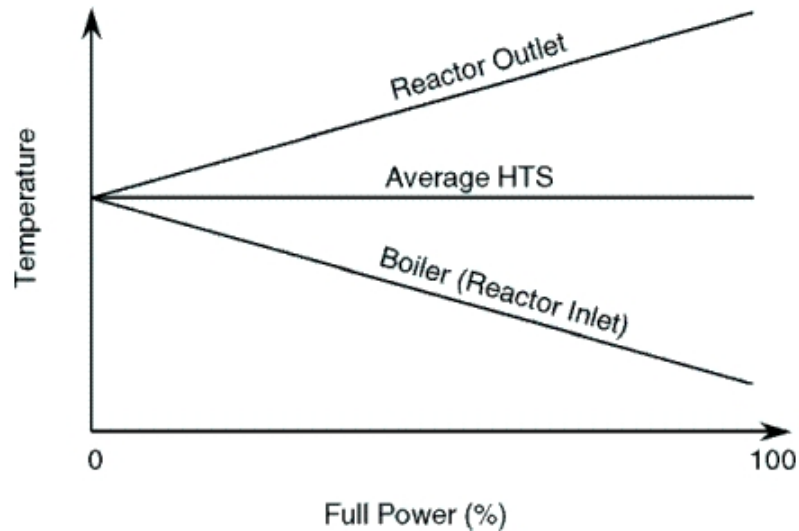


Figure 3.7 – Tendances de la température du réacteur, du générateur de vapeur et du CC

Temperature	Température
Reactor Outlet	Température de sortie du réacteur
Average HTS	Température moyenne dans le CC
Boiler (Reactor Inlet)	Température dans le générateur de vapeur (entrée du réacteur)
Full Power (%)	Pleine puissance (%)

Le transfert d'inventaire entre l'état pressurisé froid et la puissance zéro chaude, afin de compenser le retrait et le gonflement, se fait par le circuit d'alimentation et de purge et par l'inventaire du réservoir de stockage du D₂O.

3.2.5 Transfert et stockage du D₂O

Lien inter-réacteurs du circuit de transfert du D₂O

Dans une centrale CANDU de type courant (à un seul ou à plusieurs réacteurs), on doit s'assurer que la quantité et la qualité du D₂O disponible sont suffisantes pour l'exploitation sûre et prolongée du réacteur.

Dans chaque centrale (à plusieurs réacteurs) il y a une installation de stockage central du D₂O qui reçoit les expéditions de D₂O provenant des usines de fabrication. Le D₂O peut être pompé de cet emplacement vers les circuits du réacteur au besoin. Cette installation joue également le rôle de réservoir de D₂O pour un circuit de modérateur ou un CC, dans le cas où un circuit de réacteur devrait être drainé.

Ce système d'alimentation et de distribution central réduit au minimum la manutention des fûts de D₂O et, par conséquent, réduit l'exposition du personnel au tritium associée à tout déversement qui risquerait de se produire. Cela permet également de transférer rapidement du D₂O. Le système permet également de transférer le D₂O entre les réacteurs.

Le stockage distinct est assuré pour le D₂O à plus faible teneur isotopique qui pourrait s'être échappé ou avoir été enlevé des circuits du réacteur. Ce réservoir est habituellement la source de D₂O pour l'installation d'augmentation de la teneur isotopique dans la centrale. Étant donné que le D₂O du CC a une teneur en tritium plus faible que celle du modérateur, un stockage distinct est assuré pour chaque circuit.

Réservoirs de stockage du D₂O

Le CC de chaque réacteur possède son propre réservoir de stockage de D₂O. Cela permet :

- a) d'assurer un stockage fermé du D₂O afin de compenser les fuites du CC;
- b) de compenser le retrait et le gonflement du D₂O du circuit pendant les manœuvres de puissance du réacteur;
- c) de fournir une hauteur d'aspiration pour les pompes d'alimentation (pressuriseur) du CC.

Tel qu'indiqué en b), le niveau du réservoir de stockage varie selon l'état de fonctionnement du réacteur.

Il est important de maintenir un niveau minimum afin de s'assurer que la hauteur d'aspiration de pompe d'alimentation est adéquate et que l'inventaire est suffisant pour les conditions d'exploitation normales prévues.

Un niveau trop élevé à faible puissance peut faire en sorte que le réservoir sera entièrement rempli par le gonflement à mesure que la puissance augmente. Le réservoir fait partie du circuit CC scellé,

même à basse pression (habituellement 10 à 20 kPa (manométrique)). L'espace vapeur au-dessus du D₂O est rempli d'hélium et constitue une atmosphère non corrosive et non explosive ayant la capacité d'éliminer le D₂ (produit par radiolyse) grâce à la purge. Cet espace sera perdu à un niveau très élevé, ce qui permettra au réservoir de se pressuriser. Toute surpression est contrée par ouverture des vannes vers le circuit de récupération/collecte. Une protection extrême contre la surpression est assurée par un disque de rupture, qui décharge le caloporteur en excès vers le confinement.

Notions principales

- Lorsque le niveau du pressuriseur est faible, les réchauffeurs électriques pourraient être exposés à la vapeur, ce qui causerait de la combustion. En outre, le niveau doit être maximisé afin de s'assurer que l'inventaire est suffisant pour un retrait rapide d'appoint. Lorsque le niveau du pressuriseur est élevé, cela pourrait faire en sorte que le pressuriseur devienne solide, entraînant par conséquent une perte de contrôle de la pression.
- Le niveau du pressuriseur augmente par palier en fonction des changements de puissance afin de compenser le retrait et le gonflement et de réduire au minimum l'alimentation et la purge.
- L'alimentation et la purge sont réduites au minimum dans le cas des systèmes qui ne sont pas dotés de pressuriseurs en faisant diminuer graduellement la pression du générateur de vapeur à mesure que la puissance du réacteur augmente. Cela permet de maintenir constante la température moyenne du CC afin de réduire le gonflement. En ce sens, les réacteurs sont exploités comme des unités de charge de base.
- Le circuit d'alimentation et de purge permet de transférer l'inventaire entre l'état pressurisé froid et la puissance zéro chaude.
- Le but des liens de D₂O inter-réacteurs consiste à servir de lieu de stockage central et de dispositif de distribution du D₂O, ainsi que de permettre le transfert du D₂O entre les réacteurs.
- Le rôle du réservoir de stockage de D₂O est de fournir du D₂O en cas de perte d'eau d'appoint, de compenser le retrait et le gonflement et d'assurer une hauteur de pompe positive. Un niveau minimum doit être maintenu afin de compenser les

pertes par du D₂O d'appoint et de s'assurer que la hauteur de pompe adéquate est maintenue à la pompe d'alimentation. Lorsque le niveau est élevé, cela pourrait faire en sorte que le réservoir passe en mode solide, et causer une perte de caloporteur vers le circuit de collecte/récupération ou vers le confinement par les disques de rupture.

3.2.6 *Purge hors du circuit*

Nous avons déjà mentionné qu'une partie de l'inventaire du CC est déviée du circuit sur une base continue et subit un processus d'épuration.

Ce nettoyage est effectué par des filtres, des colonnes échangeuses d'ions et des crépines. Les résines échangeuses d'ions ne sont généralement pas en mesure de tolérer des températures excessives. Des températures supérieures à ~60 °C peuvent réduire l'efficacité des résines et entraîner la libération de fluorure et de chlorure. Ces ions favorisent la fissuration par corrosion sous contrainte dans les composants en zirconium et en acier inoxydable du CC. Dans certaines centrales, l'épuration se fait à la pression maximale du circuit, alors que dans d'autres centrales elle se fait à une pression réduite.

Le D₂O épuré est soit retourné au circuit CC ou est conservé dans le réservoir de stockage du D₂O à une pression proche de la pression atmosphérique et refroidi (comme nous l'avons mentionné plus tôt). Ce réservoir est maintenu à une pression proche de la pression atmosphérique. Cela permet également d'accueillir le D₂O en excès dû au gonflement lors du réchauffement d'un réacteur à partir de l'état froid (le système de transfert et de stockage du D₂O est utilisé, au besoin, pour maintenir le niveau du réservoir de stockage de D₂O dans la plage convenable).

Par conséquent, pour le stockage dans toutes les centrales et pour l'épuration dans la plupart d'entre elles, il est nécessaire de refroidir et de dépressuriser la purge provenant du CC. Pour ce faire, différentes méthodes sont suivies, notamment celles décrites ci-après.

3.2.7 *Purge/Épuration à l'aide des condenseurs de purge*

Un circuit de contrôle/d'épuration de l'inventaire et de la pression représentatif est illustré à la figure 3.8.

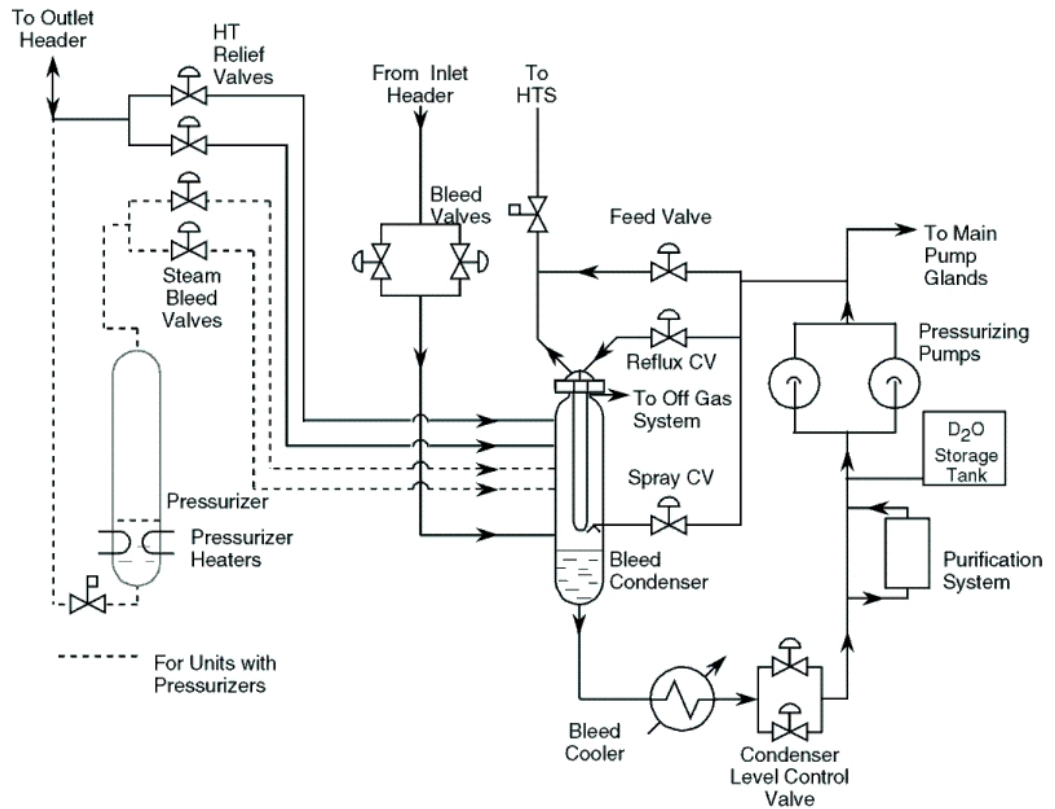


Figure 3.8
Contrôle de la pression du caloporteur dans les circuits utilisant des condenseurs de purge

To Outlet Header	Vers le collecteur de sortie
HT Relief Valves	Vannes de décharge du CC
From Inlet Header	En provenance du collecteur d'entrée
To HTS	Vers le CC
Feed Valve	Vanne d'alimentation
Bleed Valves	Vannes de purge
To Main Pump Glands	Vers les garnitures de pompes principales
Pressurizing Pumps	Pompes de pressurisation
D ₂ O Storage Tank	Réservoir de stockage du D ₂ O
Purification System	Circuit d'épuration
Reflux CV	VC antiretour
To Off Gas System	Vers le circuit des effluents gazeux
Spray CV	VC d'aspersion
Bleed Condenser	Condenseur de purge
Steam Bleed Valves	Vannes de purge de vapeur
Pressurizer	Pressuriseur
Pressurizer Heaters	Réchauffeurs du pressuriseur
For Units with Pressurizers	Pour les réacteurs dotés de pressuriseurs
Bleed Cooler	Refroidisseur de purge
Condenser Level Control Valve	Vanne de contrôle du niveau du condenseur

Le condenseur de purge joue deux rôles principaux :

- a) réduire la pression et la température de la purge provenant du CC d'environ 9 à 10 MPa et ~ 300 °C (8 MPa et 250 °C dans certaines centrales) à 2 MPa et à ~ 200 °C.
- b) accueillir toute décharge de D₂O provenant du CC. Cette décharge peut être liquide (par les vannes de décharge du CC) ou se présenter sous forme de vapeur (en provenance du pressuriseur par les vannes de purge de vapeur).

Le condenseur de purge, comme son nom l'indique, condensera tout écoulement de purge en provenance du CC. Il existe deux méthodes pour accomplir cette action de condensation :

Refroidissement à reflux

- a) Cette méthode utilise l'écoulement de D₂O déjà refroidi et épuré qui est recirculé ou retourné au CC par les pompes de pressurisation (alimentation) et en les passant dans une grappe de tubes se trouvant dans le condenseur de purge. En plus de condenser la vapeur, cela chauffe le D₂O qui retourne au CC, en récupérant ainsi efficacement la chaleur.

Refroidissement par aspersion

- b) Cette méthode consiste à asperger le D₂O refroidi en contact direct avec l'écoulement de purge d'admission (à noter que l'écoulement de purge passe à l'état vapeur lorsqu'il se retrouve dans la basse pression du condenseur de purge).

On a recours au refroidissement par aspersion à titre de méthode de secours lorsque le refroidissement à reflux ne permet pas de maintenir le procédé à la valeur seuil requise. Si l'écoulement de reflux est au maximum et que la pression continue d'augmenter dans le condenseur, l'aspersion débutera. Cette méthode de contact direct pour la condensation devrait faire baisser rapidement la pression mais risque de mélanger le D₂O déjà refroidi et épuré avec le D₂O à traiter. Cela met une charge plus grande dans le circuit d'épuration. Le refroidissement par aspersion risque également de compliquer le dégazage du caloporteur dans le condenseur de purge. Cela risque de compromettre le refroidissement à reflux. Des problèmes de contrôle de niveau risquent également de survenir dans le condenseur de purge, étant donné que la purge arrive à une grande vitesse, et que le refroidissement par aspersion augmente l'inventaire.

Le D₂O qui quitte le condenseur de purge a une pression d'environ 2,0 MPa et une température d'environ 200 °C.

Le refroidisseur de purge permet également de refroidir à moins de 50 °C le D₂O avant qu'il ne traverse les colonnes échangeuses d'ions.

Des thermoplongeurs peuvent être utilisés pour établir les conditions de saturation initiales dans le condenseur de purge (seulement dans certaines centrales). Dans d'autres centrales, l'eau relativement chaude provenant du CC vers le réservoir de stockage du D₂O fournit l'énergie nécessaire pour réchauffer le condenseur de purge. Des vannes de décharge sont nécessaires pour évacuer la pression hors du condenseur de purge, lorsque le niveau devient suffisamment élevé pour amener le condenseur de purge en mode solide. Les vannes de décharge du condenseur de purge évacuent le D₂O vers le puisard de récupération (ou un réservoir dans certaines centrales) à l'intérieur du confinement. (Ces composants ne sont pas illustrés à la figure 3.8).

3.2.8 *Purge/épuration à l'aide du condenseur du dégazeur*

Un circuit d'inventaire/d'épuration et de pression utilisant le condenseur du dégazeur est illustré à la figure 3.9

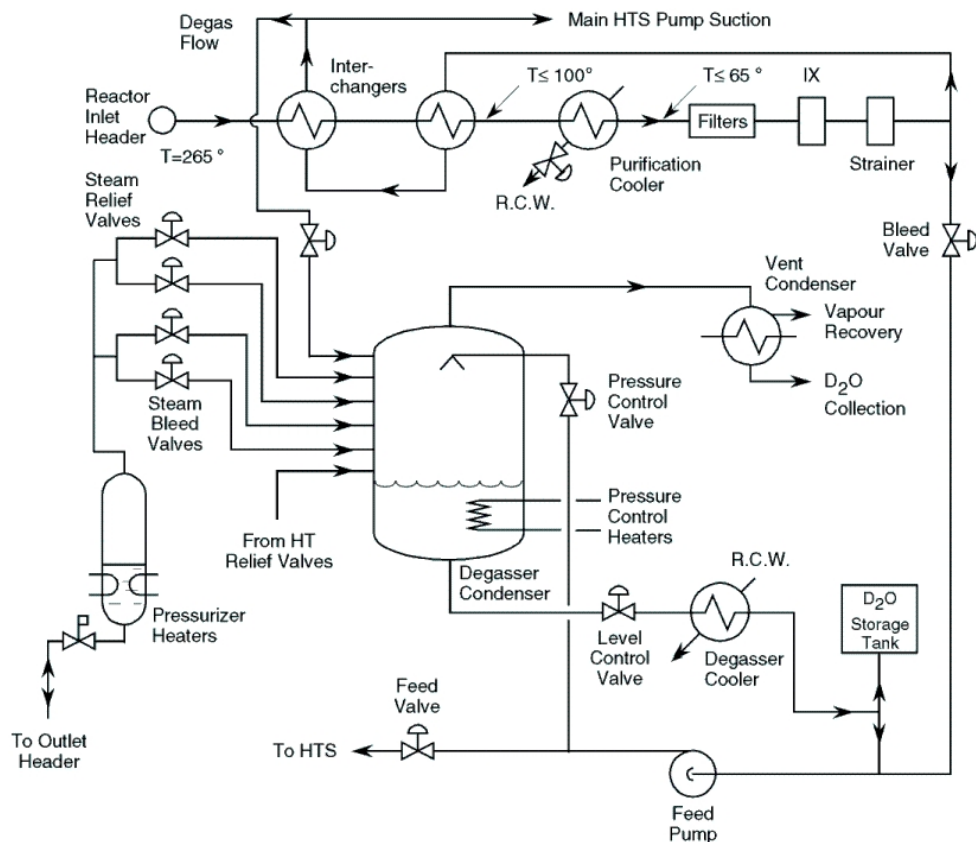


Figure 3.9
Circuits de purge, d'épuration, de pressurisation et de dégazage
des réacteurs de 600 MW

Degas Flow	Écoulement du dégazeur
Reactor Inlet Header	Collecteur d'entrée du réacteur
Steam Relief Valves	Vannes de décharge de vapeur
Main HTS Pump Suction	Aspiration de la pompe principale du CC
Inter-changers	Échangeurs
Filters	Filtres
R.C.W.	ERR (eau de refroidissement du réacteur)
Purification Cooler	Refroidisseur d'épuration
Strainer	Crépine
Bleed Valve	Vanne de purge
Vent Condenser	Condenseur d'évacuation
Vapour Recovery	Récupération de vapeur
D ₂ O Collection	Collecte du D ₂ O
Pressure Control Valve	Vanne de contrôle de la pression
Steam Bleed Valves	Vannes de purge de vapeur
From HT Relief Valves	En provenance des vannes de décharge du CC
Pressure Control Heaters	Réchauffeurs de contrôle de la pression
Degasser Condenser	Condenseur du dégazeur
R.C.W.	ERR
Level Control Valve	Vanne de contrôle du niveau
Degasser Cooler	Refroidisseur du dégazeur
D ₂ O Storage Tank	Réservoir de stockage du D ₂ O
Feed Pump	Pompe d'alimentation
Feed Valve	Vanne d'alimentation
Pressurizer Heaters	Réchauffeurs du pressuriseur
To Outlet Header	Vers le collecteur de sortie
To HTS	Vers le CC

À noter que l'épuration dans ce type de circuit est effectuée à la pression maximale du circuit. Étant donné que les pompes du CC dirigent l'écoulement d'épuration, elles sont indépendantes du circuit de purge. C'est pourquoi les écoulements de purge peuvent être très faibles durant le fonctionnement du circuit. Ce type d'épuration sera vu de manière plus approfondie dans un module ultérieur.

Dans ce circuit, le condenseur du dégazeur joue deux grands rôles :

- a) Accueillir toute décharge de D₂O provenant du CC. Le D₂O peut être sous forme liquide (par les vannes de décharge du CC) ou sous forme de vapeur (en provenance du pressuriseur par les vannes de purge de vapeur ou les vannes de décharge).

- b) Réduire la pression et la température de l'écoulement provenant du CC d'environ 9 à 10 MPa et ~ 300 °C à 1,2 MPa et ~ 190 °C.
- c) Dégazer les écoulements provenant du CC. Cette fonction de dégazage sera examinée dans un autre module.

Le condenseur du dégazeur condensera l'écoulement provenant du CC en aspergeant le D₂O refroidi en contact direct avec les écoulements entrant (qui passeront à l'état de vapeur lorsqu'ils seront en contact avec la basse pression du condenseur du dégazeur).

Le refroidisseur du dégazeur refroidira le D₂O à moins de 70 °C (habituellement ≤ 30 °C) avant de le retourner au CC ou au réservoir de stockage du D₂O. Ce refroidissement additionnel est requis en raison du fait que des températures élevées à ce moment-ci causeraient des problèmes d'aspiration positive nette à la pompe d'alimentation. À noter qu'il n'y a pas de contrôle de la température dans le refroidisseur du dégazeur (autre que le dépassement de la température élevée dans les vannes de contrôle de niveau). L'eau de refroidissement en recirculation est toujours au débit maximal afin d'assurer un refroidissement maximal.

À noter que les thermoplongeurs électriques peuvent être utilisés pour maintenir les conditions dans le condenseur du dégazeur qui sont requises pour le dégazage (lorsque les écoulements de purge de vapeur sont insuffisants pour maintenir la pression). Tout comme le condenseur du dégazeur, les vannes de décharge sont nécessaires pour assurer la décharge de pression du condenseur du dégazeur lorsque le niveau augmente suffisamment pour faire passer le condenseur du dégazeur en mode solide (ce phénomène n'est pas illustré à la figure 3.9). La décharge des vannes du condenseur est envoyée dans le puisard de récupération dans le confinement.

3.2.9 Manœuvres de puissance

Les figures 3.8 et 3.9 illustrent, dans un format très simple, deux types de circuit de pressuriseur ainsi qu'un circuit d'alimentation et de purge que l'on trouve dans les réacteurs CANDU. Nous pouvons utiliser ces diagrammes pour expliquer comment les différents circuits réagissent aux manœuvres de puissance normale (entre 0 % et 100 % PP) et à un nombre limité d'excursions du système.

Circuit du pressuriseur

Comme nous l'avons mentionné précédemment, une augmentation de la puissance du réacteur augmente la température moyenne du CC.

Cela cause un gonflement correspondant du caloporteur, ce qui entraîne une augmentation de pression. L'augmentation de la pression et de l'inventaire causera :

- a) L'entrée d'un inventaire de D_2O additionnel dans le pressuriseur;
- b) La compression accrue de l'espace vapeur au-dessus du liquide dans le pressuriseur.

L'effet b) peut être compensé par le système de contrôle qui ouvrira les vannes de purge de vapeur dans le pressuriseur jusqu'à ce que la pression soit ramenée à la valeur seuil.

Étant donné que la valeur seuil du niveau du pressuriseur augmente graduellement à mesure que la puissance du réacteur augmente, l'inventaire transféré vers le pressuriseur permettra au D_2O excédentaire d'amener son niveau à la nouvelle valeur seuil. Tout écart sera compensé par l'ouverture de la vanne de purge.

La vapeur déchargée vers le condensateur de purge, en plus de toute entrée d'écoulement de purge additionnelle entraînera une augmentation de la pression et du niveau du condenseur de purge. Dans le cas du condenseur du dégazeur, la décharge de vapeur et tout écoulement du dégazage additionnel entraîneront également une augmentation de la pression et du niveau.

La pression sera ramenée à la valeur seuil grâce à un écoulement de reflux additionnel alors que l'entrée dans le condenseur de purge sera au niveau élevé. Il ne devrait pas y avoir d'aspersion lors des manœuvres de puissance normale. Dans le cas du condenseur du dégazeur, la réduction de pression sera effectuée par un refroidissement par aspersion.

L'augmentation du niveau du condenseur de purge/condenseur du dégazeur sera compensée par une ouverture plus grande des vannes de contrôle de niveau.

L'écoulement additionnel en provenance du condenseur de purge/condenseur du dégazeur augmentera la charge pour le refroidisseur de purge/refroidisseur du dégazeur. Dans le cas du refroidisseur de purge, un écoulement d'eau de refroidissement additionnel sera requis pour maintenir la température à sa valeur seuil. Dans le cas du condenseur du dégazeur, la température à la sortie du refroidisseur du dégazeur augmentera légèrement à mesure que la

charge thermique augmente (à noter que les vannes ERR sont toujours entièrement ouvertes).

Une fois que la nouvelle puissance en régime permanent a été établie, il est probable que les vannes de reflux, les vannes de contrôle de niveau et les vannes de contrôle de l'eau de refroidissement (s'il y a lieu) seront ramenées à leurs positions comme elle était avant les manœuvres.

Lors d'une réduction de puissance importante, le caloporteur du CC subit un retrait, ce qui donnera lieu à une diminution du niveau du pressuriseur et à une légère réduction de la pression dans l'espace vapeur du pressuriseur. Les réchauffeurs du pressuriseur interviendront pour ramener la pression du circuit à sa valeur seuil.

Circuit d'alimentation et de purge

Dans le cas du circuit d'alimentation et de purge, une augmentation de la puissance de sortie du réacteur entraînera une nouvelle valeur seuil pour la pression du générateur de vapeur. À noter que cela permettra de maintenir la température du circuit caloporteur relativement constante pendant les manœuvres de puissance normale. Cependant, les ajustements de la pression du générateur de vapeur seront limités pour permettre un épaissement raisonnable des cuves des générateurs de vapeur (limite de haute pression) et pour maintenir l'efficacité thermique élevée du cycle (limite de basse pression).

À cause de ces limites, la température moyenne du circuit caloporteur augmentera légèrement pendant le chargement du réacteur. Par conséquent, la pression dans le CC augmentera également. L'ouverture de la vanne de purge sera nécessaire pour réduire la pression à la valeur seuil.

L'écoulement de purge additionnelle répondra à peu près de manière semblable (comme nous l'avons vu plus tôt dans la section sur le pressuriseur) face à la pression du condenseur de purge, aux contrôleurs de niveau et au contrôleur de la température du refroidisseur de purge.

À noter que lors des réductions de puissance, c'est le contraire qui se produit, c.-à-d. que la température moyenne du CC diminuera, ce qui causera une baisse de la pression dans le CC. Cette diminution de pression exigera une alimentation pour ramener la pression à sa valeur seuil.

La purge sera moins importante, ce qui générera un écoulement de reflux moins important afin d'éviter que la pression du condenseur de purge ne baisse. L'écoulement de sortie du condenseur de purge sera réduit afin de maintenir le niveau. Ainsi, la charge diminuera pour le refroidisseur de purge.

3.2.10 *Notions principales*

- La pression du condenseur de purge est contrôlée en condensant le D₂O à l'aide d'un refroidissement à reflux et d'un refroidissement par aspersion. Le refroidissement par aspersion constitue une méthode de secours étant donné qu'elle augmente la charge dans le circuit d'épuration et crée des problèmes de contrôle de niveau. Dans le cas des centrales qui utilisent un condenseur du dégazeur, le refroidissement se fait par aspersion seulement.
- À mesure que la puissance du réacteur augmente, les circuits du pressuriseur réagissent comme suit :
 - La température du CC augmente, ce qui cause un gonflement et une augmentation de la pression dans le CC;
 - Les vannes de purge de vapeur s'ouvrent afin de réduire la pression dans le CC;
 - Le niveau du pressuriseur augmente en raison du gonflement (la valeur seuil du niveau augmente également);
 - Le niveau du condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur) augmente et la charge du refroidisseur de purge (ou refroidisseur du dégazeur) augmente;
 - Il faut réduire la purge au minimum.
- À mesure que la puissance du réacteur augmente, dans un circuit d'alimentation et de purge (sans pressuriseur), la réponse sera comme suit :
 - La pression du générateur de vapeur diminuera graduellement afin de maintenir la température moyenne du CC constante, et l'augmentation de pression dans le CC sera réduite au minimum;

- Le niveau du condenseur de purge augmente à cause de l'augmentation de l'écoulement de purge et de la charge accrue dans les refroidisseurs de purge.

3.2.11 Décharge du CC

La décharge de pression doit être assurée afin d'éviter la surpressurisation accompagnée d'une rupture consécutive des composants du CC.

La rupture des composants pourrait donner lieu à l'un des éléments suivants, ou à une combinaison de ces événements :

1. Un déversement de caloporteur du CC nécessitant un refroidissement d'urgence par injection si la perte de caloporteur est suffisamment importante (c.-à-d. perte du milieu caloporteur);
2. Des défaillances du combustible dues à la diminution de la capacité de refroidissement (par suite de l'expulsion du caloporteur hors des canaux dans le CC suite à une pression réduite du circuit);
3. Une augmentation de la puissance du réacteur due à une augmentation de réactivité par suite d'un coefficient de vide positif. Cette situation exigerait le fonctionnement des systèmes d'arrêt d'urgence afin de réduire la puissance si le SRR (système de régulation du réacteur) est incapable de contrôler la puissance.

La décharge réduit évidemment la probabilité que ces événements non souhaitables se produisent.

À noter que les événements qui causent des augmentations de la pression ou un gonflement plus important mais lent dans le CC ne sont pas habituellement des événements préoccupants, étant donné qu'ils sont gérés par le système de contrôle de la pression et de l'inventaire. Par ailleurs, des augmentations rapides de la pression (dépassant la capacité du système de contrôle de la pression et de l'inventaire), risquent d'entraîner une surpressurisation grave, à moins d'être arrêtée.

La surpressurisation dans le CC peut être causée par :

Compression mécanique du caloporteur

Cela pourrait résulter de la pressurisation des pompes d'alimentation qui fournissent du D₂O au circuit à un taux

supérieur au taux auquel le contrôle de la pression et de l'inventaire peuvent faire face (p. ex. purge insuffisante pour le CC en raison du mauvais fonctionnement d'une vanne de purge).

Dans certaines centrales, cette condition est également possible pendant le rechargement de combustible à cause d'une surpressurisation imputable aux pompes de pressurisation de la machine de combustible. Cela peut constituer une préoccupation si les dispositifs de décharge de surpression des machines de chargement de combustible n'ont pas fonctionné.

Gonflement du caloporteur dû à une augmentation de la température dans le CC

Si le gonflement du caloporteur, par suite d'une augmentation de la température moyenne du CC, ne peut être contenu par les systèmes de contrôle de la pression et de contrôle de l'inventaire, une surpressurisation importante du CC risque de se produire.

Ces événements sont potentiellement plus dangereux que la surpressurisation mécanique, en raison des niveaux de surpression associés à ce type d'événement, qui peuvent être très élevés (supérieurs à la capacité des vannes de décharge).

Les événements menant à ce type de surpressurisation comprennent notamment :

- a. L'incapacité des réchauffeurs du pressuriseur à se fermer à la valeur seuil de la pression du CC. L'ébullition accrue dans le pressuriseur augmentera la pression du D₂O dans celui-ci. Étant donné que le pressuriseur et le circuit caloporteur sont reliés, la pression augmentera également dans le CC principal.
- b. La perte de régulation du réacteur causant une augmentation de la puissance du réacteur au-dessus de la valeur seuil normale pleine puissance. En supposant que le taux de production de chaleur est supérieur au taux d'évacuation de la chaleur, cela pourrait causer un gonflement du CC et une élévation de pression correspondante (contre laquelle on peut se protéger en déclenchant le système d'arrêt d'urgence).

- c. La perte des pompes de circulation du CC lorsque le réacteur est en régime de puissance. La perte d'écoulement du caloporteur donnera lieu à une augmentation immédiate de la température moyenne du CC, ce qui mènera à une pression élevée dans le CC (contre laquelle on peut se prémunir en déclenchant le système d'arrêt d'urgence – qui à son tour est protégé contre l'écoulement faible dans le CC et contre la pression élevée dans le CC).
- d. Des excursions du circuit (générateur de vapeur) classiques
 - i) L'arrêt de l'écoulement de vapeur provenant des générateurs de vapeur en raison d'un arrêt de la turbine ou d'un rejet de charge. Ce genre de situation est habituellement corrigé en fournissant une autre source froide (décharge de vapeur) et en réduisant l'entrée de chaleur dans le circuit en ayant recours au recul rapide de puissance ou à la baisse contrôlée de la puissance du réacteur. Si les mesures correctrices ne sont pas appliquées, l'évacuation de la chaleur hors du CC sera compromise, ce qui pourrait causer une augmentation de la température moyenne du CC et une augmentation correspondante de la pression dans le CC.
 - ii) La perte ou la réduction de l'eau d'alimentation du générateur de vapeur et la perte consécutive de la capacité d'agir comme source froide. Lorsque la capacité d'agir comme source froide dans les générateurs de vapeur diminue, la température et la pression du CC augmentent rapidement. Cela s'explique principalement par la perte d'effet de refroidissement des préchauffeurs (environ 20 % de la source froide).

3.2.12 Méthodes de réduction de la pression dans le CC

Il existe deux méthodes visant à réduire la pression : la méthode directe et la méthode indirecte

La réduction de pression directe fait allusion aux méthodes qui sont appliquées directement au CC. Les méthodes indirectes sont des effets secondaires des mesures prises pour contrôler le circuit de vapeur. En influençant d'abord le circuit de vapeur, on observe

une variation dans la capacité d’agir comme source froide, ce qui a une incidence sur la pression du D₂O dans le CC.

De façon générale, les mécanismes de réduction directe de la pression peuvent supporter des surpressions du CC résultant à la fois d’augmentations de la température du CC et de problèmes mécaniques, alors que les méthodes indirectes sont en mesure de supporter seulement les événements résultant des augmentations de température du CC. La raison de cette limite est expliquée plus loin.

Réduction directe de la pression

La pression du CC, habituellement mesurée au collecteur de sortie du réacteur, permet d’amorcer différentes actions de décharge. Elles sont illustrées à la figure 3.10.

Vannes de décharge du CC

Les vannes de décharge du CC constituent la première défense contre une augmentation de pression non contrôlée. Elles sont généralement assez nombreuses, installées en parallèle, et déchargent l’écoulement du collecteur de sortie du réacteur vers le condenseur de purge (ou, dans certaines centrales, vers le condenseur du dégazeur). Ces vannes déchargent le caloporteur en excès du CC, ce qui limite la surpression. Bien que les vannes de sûreté du générateur de vapeur soient capables de décharger la vapeur produite par le fonctionnement du réacteur à une puissance de 100 % ou plus, les vannes de décharge du CC ont seulement une capacité de décharge limitée.

La raison de cet écart apparent est que les vannes de décharge du CC sont prévues pour correspondre à la capacité de surpressurisation causée seulement par des méthodes mécaniques (pompe). Il ne serait pas souhaitable de fournir une capacité de vanne de décharge pour tous les événements probables, car cela augmenterait le risque de décharge en excès, avec perte d’inventaire. Cela donnerait lieu à des conditions saturées dans le CC principal et à une ébullition excessive dans le CC. Cela pourrait causer des bancs de vapeur et une surchauffe du combustible. Les vannes de décharge pourraient avoir des valeurs seuils par palier afin de permettre des augmentations graduelles de la pression dans le CC.

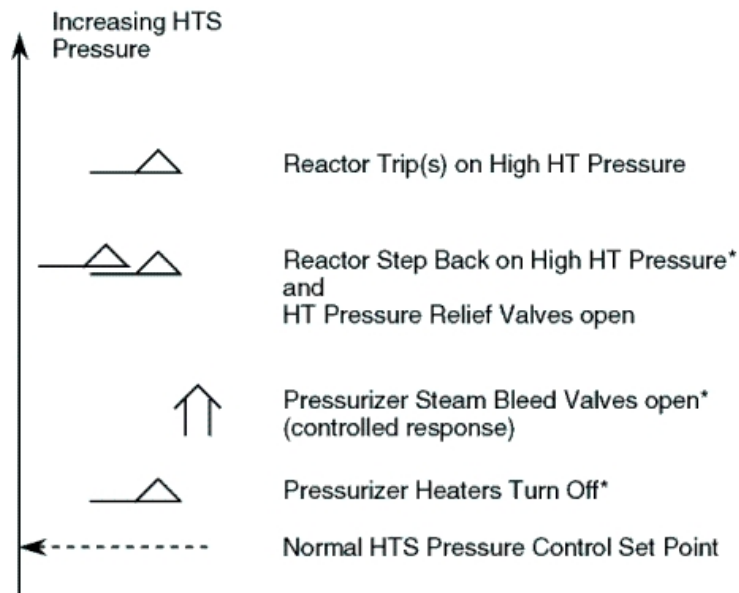
Réductions de puissance du réacteur

Si les vannes de décharge sont incapables d’arrêter l’augmentation de pression, on peut procéder à un recul de puissance (diminution de la puissance de réacteur; habituellement de 30 %). Cela permet un retrait

rapide du caloporteur ainsi qu'une baisse rapide de pression dans le CC. Cette méthode ne s'applique pas dans les réacteurs autres que ceux qui sont dotés de barres de commandes.

Dans les centrales qui ne possèdent pas de barres de commandes, les tentatives initiales de réduction de la pression dans le CC se font par décharge du caloporteur au moyen des vannes de purge et des vannes de décharge. Cela cause un niveau élevé dans le condenseur de purge. Il risque d'y avoir une baisse contrôlée de puissance lorsque le niveau du condenseur de purge est élevé. La baisse contrôlée de puissance est une baisse de puissance qui donne lieu à un retrait du caloporteur plus graduel que lors d'un recul de puissance, c.-à-d. une réduction de la pression qui sera plus lente que dans le cas d'un recul rapide de puissance.

L'augmentation de la pression qui ne peut être arrêtée par les vannes de décharge ou par un recul rapide/une baisse contrôlée de puissance du réacteur aura finalement pour effet d'arrêter le réacteur. Cela réduit rapidement la puissance thermique aux niveaux de désintégration (~ 7 % PP), causant un retrait rapide du D₂O dans le CC et une réduction de la pression.



* Not in all stations

Figure 3.10
Quelques méthodes directes de réduction de la pression dans le CC

Increasing HTS Pressure	Augmentation de la pression dans le CC
Reactor Trip(s) on High HT Pressure	Arrêt du réacteur à cause de la pression dans le CC
Reactor Step Back on High HT Pressure* and HT Pressure Relief Valves open	Recul rapide de puissance suite à une pression* élevée dans le CC Vannes de décharge ouverte
Pressurizer Steam Bleed Valves open* (controlled response)	Vannes de purge de vapeur du pressuriseur ouvertes* (réponse contrôlée)
Pressurizer Heaters Turn Off*	Fermeture* des réchauffeurs du pressuriseur
Normal HTS Pressure Control Set Point	Valeur seuil normale du contrôle de la pression dans le CC
* Not in all stations	* Pas dans toutes les centrales

Méthodes indirectes de réduction de la pression

Les méthodes indirectes agissent sur le circuit de vapeur afin de réduire la température moyenne du CC. Cette diminution de température donne lieu à un retrait du caloporteur. Le retrait du caloporteur cause une diminution de la pression dans le CC.

La réduction de température est obtenue en abaissant la pression du générateur de vapeur (et par conséquent la température du générateur de vapeur, étant donné que les générateurs sont saturés). Le ΔT élevé entre D₂O du CC et le H₂O du générateur de vapeur donneront lieu à un transfert thermique élevé en provenance du CC et, par conséquent, à une réduction de la température moyenne du D₂O dans le CC.

La décharge de vapeur du côté secondaire fait baisser la pression du générateur de vapeur; la figure 3.11 illustre les méthodes disponibles. Une augmentation de la pression dans le CC due seulement aux mécanismes de surpression mécaniques ne peut pas être réglée par des méthodes indirectes (à moins qu'il y ait intervention manuelle) et ne pourra, d'elle-même, faire ouvrir les vannes de vapeur.

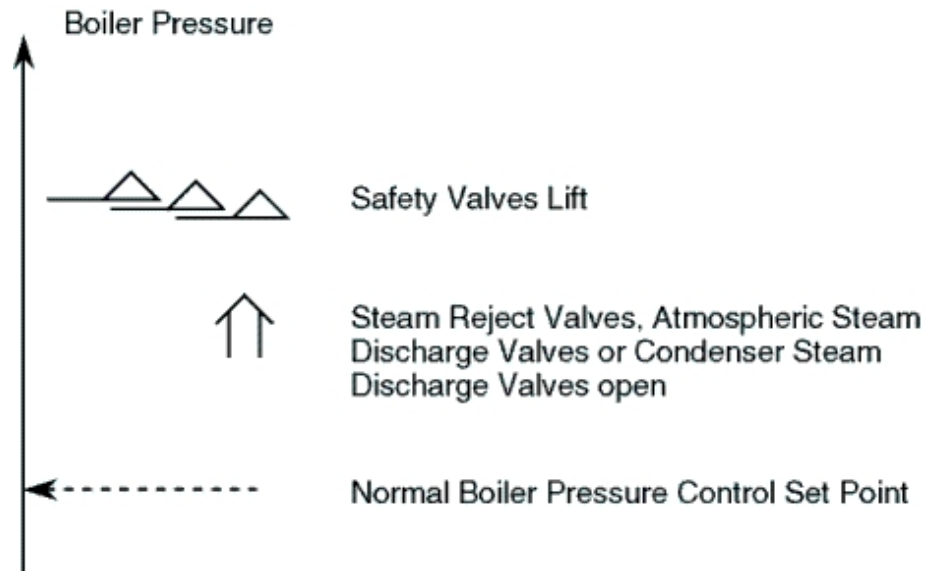


Figure 3.11
Méthodes de réduction indirectes de la pression dans le CC

Boiler Pressure	Pression du générateur de vapeur
Safety Valves Lift	Soulèvement des vannes de sécurité
Steam Reject Valves, Atmospheric Steam Discharge Valves or Condenser Steam Discharge Valves open	Vannes de rejet de vapeur, vapeur atmosphérique, vannes de décharge ou vannes de décharge de vapeur du condenseur ouvertes
Normal Boiler Pressure Control Set Point	Valeur seuil normale du contrôle de la pression du générateur de vapeur

Dans la plupart des centrales, les vannes de décharge de vapeur atmosphérique et les vannes de décharge de vapeur du condenseur sont utilisées. Les autres centrales utilisent des vannes de rejet de vapeur qui déchargent seulement à l'atmosphère. Bien sûr, toutes les centrales utilisent des vannes de sûreté.

La décharge de vapeur (dans l'atmosphère ou le condenseur) fournit une source froide additionnelle ou de rechange aux turbines. Si l'évacuation de la chaleur assurée par la décharge de vapeur est égale à l'entrée de puissance dans les générateurs de vapeur, alors il n'y aura aucune augmentation de la pression dans le CC.

Dans certaines centrales, les vannes de rejet de vapeur, ou les vannes qui combinent une décharge atmosphérique et une décharge vers le condenseur ont une capacité d'au moins 75 % pleine puissance. Ainsi, elles sont en mesure de supporter des excursions de puissance plutôt importantes. Cependant, si elles assurent un contrôle inadéquat de la pression de vapeur, les vannes de sûreté (réglées à des pressions plus

élevées) assureront une autre source froide. Les vannes de sécurité sont requises par la loi et doivent être capables d'évacuer >100 % de la vapeur produite par la puissance (compte tenu des valeurs prédéterminées d'arrêt du réacteur et des écarts de la puissance de canal [variation]).

On peut également avoir recours au rejet de vapeur, avec des méthodes directes de réduction de la pression, afin de faire face aux excursions de gonflement du caloporteur. Dans ce cas, des vannes de rejet de vapeur (VRV) peuvent être ouvertes manuellement par l'opérateur du réacteur, des VRV manuelles peuvent s'ouvrir lentement, mais elles ont une grande capacité. Selon la centrale, l'ouverture des VRV (ou VDVA) permet également de servir de paramètre déclencheur pour un recul rapide de puissance afin de réduire la pression en diminuant l'admission de chaleur dans le CC.

L'ouverture automatique des VRV pourrait contrer une augmentation de pression du CC. En raison du délai [~10 secondes] entre la décharge de vapeur et le changement de température moyenne du CC, des surpressions rapides du CC causées par des événements dans le circuit primaire pourraient ne pas être contrôlées automatiquement par cette méthode. Lorsque le réacteur est mis à l'arrêt et que le circuit caloporteur est froid, le rejet de vapeur ne permet pas d'aider les dispositifs de décharge en cas de surpressurisation mécanique du circuit caloporteur, étant donné qu'il n'y a pas de vapeur à évacuer.

3.2.13 Notions principales

- La décharge de pression doit être assurée afin d'éviter que des dommages ne soient causés au CC.
- Les gonflements rapides dans le CC ne peuvent pas être contrôlés par les systèmes de contrôle de la pression et de l'inventaire.
- La surpressurisation est causée par la compression mécanique du caloporteur ou par le gonflement de celui-ci.
- Les méthodes directes de réduction de la pression du CC agissent directement sur le D₂O du CC (vannes de décharge, réduction de la puissance du réacteur causant un retrait du D₂O dans le CC).
- Les vannes de décharge du CC ont des dimensions qui leur permettent seulement de traiter les surpressions d'origine

mécanique. Assurer la capacité de décharge pour tous les événements possibles augmenterait le risque de décharge excessive, ce qui pourrait causer une perte d'inventaire trop importante.

3.2.14 Défaillances graves

VDV (vanne de décharge de vapeur) restée ouverte

Si une VDV demeure ouverte, le caloporteur est perdu hors du circuit. (Dans certaines centrales, ces vannes de décharge sont appelées vannes de rejet de liquide (VRL). La pression du caloporteur diminuera rapidement et des efforts visant à restaurer la pression débiteront, c.-à-d. mise en marche des réchauffeurs du pressuriseur (s'il y a lieu), purge pour restaurer l'inventaire.

L'écoulement dans les VDV causera une augmentation de la pression et du niveau du condenseur de purge (ou du condenseur du dégazeur). Une mesure de contrôle, telle que discutée précédemment, sera requise. Cela pourrait donner lieu à une baisse contrôlée de puissance lorsque le niveau du condenseur de purge est élevé. Le dépassement de la température du condenseur de purge/du dégazeur est également possible.

L'ébullition dans le CC se produit lorsque les conditions de saturation sont atteintes. L'ébullition accrue compromet le refroidissement du combustible en raison de l'ébullition pelliculaire et de l'écoulement moindre du caloporteur (en raison de la cavitation de pompe causée par une hauteur d'aspiration moins élevée).

Si la vanne ne se referme pas, un arrêt du réacteur pourrait éventuellement se produire lorsque le niveau de pressuriseur est faible (ou lorsque la pression dans le CC est faible, lorsqu'il n'y a pas de pressuriseur).

Défaillance d'une pompe d'alimentation

Lors de la défaillance d'une pompe d'alimentation, il n'y a pas d'apport d'appoint au CC (en supposant qu'il n'y a pas de pompes de secours disponibles). Lorsque des pressuriseurs ont été installés, le niveau du pressuriseur diminuera, tout en maintenant la pression du CC. Cela continuera jusqu'à ce que le niveau baisse suffisamment pour limiter la capacité du pressuriseur à répondre à une défaillance grave. Le réacteur doit être alors mis à l'arrêt et refroidi.

Dans les réacteurs qui ne possèdent pas de pressuriseurs, la pression du caloporteur commence immédiatement à baisser. L'ébullition dans le CC se produit lorsque les conditions de saturation sont atteintes. L'ébullition accrue compromet le refroidissement du combustible en raison de l'ébullition pelliculaire de l'écoulement de caloporteur moins important (en raison de la cavitation de pompe causée par une hauteur d'aspiration moins élevée).

Si la pompe d'alimentation n'est pas réparée, un arrêt du réacteur pourrait éventuellement se produire lorsque la pression du CC est faible ou lorsque l'écoulement dans le CC est faible alors que les pompes subissent la cavitation.

Vanne de purge de vapeur du pressuriseur restée ouverte

Cette défaillance réduit immédiatement la pression dans l'espace vapeur du pressuriseur et fait baisser la pression dans le CC.

L'ébullition dans le CC se produit lorsque les conditions de saturation sont atteintes. L'ébullition accrue compromet le refroidissement du combustible en raison de l'ébullition pelliculaire et de la réduction de l'écoulement du caloporteur (en raison de la cavitation de pompe causée par une hauteur d'aspiration moins élevée).

Dans le pressuriseur, l'ébullition intense fait monter le niveau du pressuriseur, ce qui entraîne la fermeture des vannes d'alimentation et l'ouverture des vannes de purge (c.-à-d. que le niveau augmente en raison de l'ébullition, mais que l'inventaire réel est perdu par les vannes). L'arrêt du réacteur lorsque la pression du circuit caloporteur est faible, est probable. En outre, une baisse contrôlée de puissance lorsque le niveau du pressuriseur est élevé, demeure possible.

L'écoulement par la vanne de purge de vapeur causera une augmentation de la pression et du niveau du condenseur de purge (ou du condenseur du dégazeur). Une mesure de contrôle, comme nous l'avons vu précédemment, sera requise. Il pourrait en résulter une baisse de contrôle de la puissance lorsque le niveau du condenseur de purge est élevé. Un dépassement de la température du condenseur de purge/du dégazeur est également possible.

Défaillance d'une pompe de circulation principale dans le CC

La majorité des réacteurs CANDU en exploitation exige l'utilisation de toutes les pompes principales du CC (habituellement il y en a quatre) pour le fonctionnement à pleine puissance. La perte d'une des pompes ou de plusieurs d'entre elles compromet sérieusement la capacité d'évacuation de la chaleur du CC en raison du faible écoulement (la circulation du caloporteur diminue alors que l'admission de chaleur dans le CC se poursuit). L'exploitation continue à pleine puissance pourrait donner lieu à une ébullition pelliculaire dans les canaux de combustible avec une probabilité élevée de défaillance du combustible et une augmentation importante de la pression.

Lorsqu'il y a perte d'une pompe de circulation unique dans ces réacteurs, un recul rapide de puissance du réacteur se produit pour réduire la sortie de puissance du réacteur à ~65 % PP. À noter que dans les circuits à deux boucles, l'arrêt d'une pompe symétrique sera requis (dans certains cas, selon la pompe ayant subi une défaillance, une mise à l'arrêt ne peut être évitée).

Dans les centrales où l'exploitation normale exige le fonctionnement de 12 à 16 pompes (trois pour chaque groupe de quatre), la perte d'une seule pompe d'un des groupes nécessiterait l'utilisation d'une pompe de secours. L'exploitation continue sans circulation suffisante du caloporteur risque de donner lieu à l'ébullition et de causer potentiellement des dommages, comme nous l'avons mentionné précédemment.

Dans le cas d'un réacteur qui utilise un circuit d'alimentation et de purge, l'augmentation résultante de la pression risquerait de dépasser la capacité du condenseur de purge. Le réacteur peut s'arrêter lorsque la pression ou la température dans le CC sont élevées, avant qu'il y ait baisse du niveau du condenseur de purge.

Dépassement du contrôle de niveau du condenseur de purge/du dégazeur

La description du condenseur de purge et du refroidisseur de purge donnée précédemment indique que le refroidisseur de purge (ou le refroidisseur du dégazeur) a une charge qui dépend de l'écoulement (qui contrôle le niveau) à la sortie du condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur).

Ainsi, les efforts visant à contrôler un niveau élevé dans le condenseur de purge peuvent produire des débordements, de sorte que le

refroidisseur de purge ne pourra plus refroidir le D₂O à 50 °C ou moins. En raison de la rupture des résines échangeuses d'ions à des températures élevées, une mesure de contrôle additionnelle est requise pour permettre au refroidisseur de purge de refroidir le D₂O à une température inférieure à celle qui a entraîné les dommages.

Étant donné que l'écoulement de l'eau de service en recirculation par le refroidisseur de purge est toujours à un maximum, le seul autre moyen de contrôler le regain consiste à réduire le débit massique du D₂O chaud par le condenseur de purge (certaines centrales possèdent une VCT à débit variable sur le refroidisseur de purge). Cette réduction de l'écoulement massique doit demeurer en fonction jusqu'à ce que la température à la sortie du refroidisseur de purge soit de nouveau acceptable. Cette mesure entraînera une perte du contrôle du niveau dans le condenseur de purge. Si les conditions qui entraînent un écoulement de purge accru relèvent du court terme, les choses devraient rapidement revenir à la normale. Si les conditions persistent, l'augmentation du niveau du condenseur de purge entraînera éventuellement une baisse contrôlée de puissance dans certaines centrales.

De même, la protection de la température du condenseur du dégazeur ou du circuit d'épuration est assurée en deux étapes. Les résines échangeuses d'ions sont protégées contre la température élevée grâce à un dépassement important de la température semblable à la sortie du refroidisseur d'épuration. Un dépassement de la température est également possible à la sortie du refroidisseur du dégazeur afin de protéger les pompes d'alimentation contre des problèmes de hauteur d'aspiration nette positive. Si la purge de vapeur continue (c.-à-d. si la pression demeure élevée dans le CC, ou qu'une vanne subit une défaillance) un recul rapide de puissance du réacteur se produira lorsque la pression du CC est élevée (des vannes de décharge du CC s'ouvriront également à ce moment-là).

Notions principales

- Lorsqu'une VDV demeure ouverte, la pression dans le CC diminue. L'ébullition pelliculaire et la défaillance du combustible sont possibles. La pression et le niveau du condenseur de purge augmenteront, et seront accompagnés d'une baisse du niveau du condenseur de purge possible et d'un dépassement important de la température. Un arrêt du réacteur à faible pression/faible niveau du pressuriseur est possible.

- La défaillance d'une pompe d'alimentation entraînera une baisse de la pression dans le CC. L'ébullition pelliculaire et la défaillance du combustible sont possibles. Le réacteur s'arrêtera lorsque la pression du CC est faible ou lorsque le niveau du pressuriseur sera faible ou que la pression du CC sera faible.
- Une vanne de purge de vapeur restée ouverte entraînera une baisse de pression dans le CC. L'ébullition pelliculaire et la défaillance du combustible sont possibles. La pression et le niveau du condenseur de purge augmenteront, et seront accompagnés d'une baisse possible du niveau élevé du condenseur de purge, ainsi que d'un dépassement important de la température. Une baisse contrôlée de la puissance du réacteur lorsque le niveau du pressuriseur est élevé ou un arrêt du réacteur lorsque la pression du CC est faible sont possibles.
- La perte d'une pompe du CC réduit l'écoulement de caloporteur dans le réacteur. L'exploitation continue à pleine puissance risque de causer l'ébullition pelliculaire. Des réductions de la puissance du réacteur sont requises soit par un recul rapide de puissance en cas de perte d'une pompe, ou par une baisse du niveau du condenseur de purge, ou encore par une excursion à la baisse de la pression ou de la température du CC.
- Le condenseur de purge possède une fonction de dépassement de la température afin de protéger les résines d'épuration contre les dommages, mais cela entraîne une perte de contrôle du niveau dans le condenseur de purge. Si la pression dans le CC demeure élevée, le niveau du condenseur de purge continuera d'augmenter (la purge se poursuit) jusqu'à ce qu'une baisse du niveau du condenseur de purge se produise.
- Le condenseur du dégazeur possède une fonction de dépassement de la température afin de protéger les pompes d'alimentation contre les dommages, mais cela entraîne une perte de contrôle du niveau du condenseur du dégazeur. Si la pression dans le CC demeure élevée, le niveau du condenseur du dégazeur continuera d'augmenter (la purge de vapeur se poursuit) jusqu'à ce qu'il y ait une baisse de la pression dans le CC (des VD liquides demeureront également ouvertes à ce moment-là). Les résines d'épuration sont protégées contre les

dommages grâce à une fonction de dépassement de la température à la sortie du refroidisseur d'épuration.

3.3 Mise à l'arrêt du circuit caloporteur

En régime de puissance, une proportion importante (habituellement 6 à 7 %) de la sortie de puissance totale d'un réacteur CANDU est due à la production de chaleur associée à la désintégration des produits de fission. Suite à une mise à l'arrêt du réacteur, ces produits de fission continuent de constituer une source de puissance thermique. Bien que la désintégration radioactive diminue l'ampleur de cette source (habituellement à environ 1 % PP (pleine puissance) en environ une heure), ait produit tout de même une quantité importante de puissance (~20 à 30 MWt, selon la centrale).

Cette caractéristique unique des centrales de production d'énergie nucléaire exige un trajet d'évacuation de la chaleur et des sources froides en tout temps lorsque le réacteur contient du combustible épuisé. Cela signifie qu'au moins une partie du CC doit être disponible pour évacuer la chaleur de désintégration du combustible.

Étant donné que cette chaleur de désintégration est toujours présente, les circuits de refroidissement doivent évacuer la chaleur de désintégration en étant alimentée par une source de catégorie III (ou au moins posséder une source d'alimentation électrique de catégorie III de secours) afin d'assurer une alimentation électrique fiable (une source froide fiable).

Sans ce refroidissement continu, il est possible que le combustible subisse une défaillance même lorsque le réacteur est à l'arrêt. Par exemple, le refroidissement insuffisant d'un réacteur à l'arrêt peut entraîner des défaillances importantes du combustible comme celle qui s'est produite à Three Mile Island. Le combustible défectueux rejette inévitablement des produits de fission dans le CC, ce qui réduit les barrières multiples contre le rejet de contaminants radioactifs.

Dans la présente section, nous allons examiner les trajets d'évacuation de la chaleur pendant la mise à l'arrêt, et après. Le refroidissement d'urgence et les systèmes de refroidissement pour l'entretien seront également examinés.

3.3.1 Types de systèmes de refroidissement à l'arrêt

Ces systèmes utilisés dans différentes centrales diffèrent et sont connus sous le nom de système à refroidissement direct ou système à refroidissement indirect. Ils utilisent tous au moins une partie du

circuit caloporteur avec un ou plusieurs points d'échange de chaleur avant d'arriver à la source froide finale (lac, rivière ou mer).

Les systèmes à refroidissement direct sont des systèmes où le D₂O du CC est refroidi directement par l'eau de service. Ce type de refroidissement est utilisé pour le refroidissement à l'arrêt dans les centrales où les préchauffeurs sont contenus dans le générateur de vapeur.

Dans le cas des systèmes à refroidissement indirect à l'arrêt, l'échange de chaleur initiale se fait du caloporteur du CC vers l'eau d'alimentation du générateur de vapeur. Cet échange de chaleur se produit dans les préchauffeurs à l'extérieur des générateurs de vapeur (installés seulement dans certaines centrales), alors que les générateurs de vapeur eux-mêmes n'y participent pas. Le deuxième échange de chaleur se fait de l'eau d'alimentation vers l'eau de service, qui transporte la chaleur vers la source froide finale (le lac, la rivière ou la mer). Il s'agit d'un système de refroidissement indirect. Cette méthode de refroidissement exige que le circuit de l'eau d'alimentation du générateur de vapeur soit en service et que les pompes du CC fonctionnent.

Un autre système de refroidissement direct distinct, connu sous le nom de système de refroidissement pour l'entretien (SRE) est disponible dans les réacteurs dotés de systèmes de refroidissement indirect à l'arrêt. Ce système permet au circuit d'alimentation et aux pompes du CC d'être mises à l'arrêt lorsque l'entretien est effectué sur le circuit d'eau d'alimentation ou sur le circuit caloporteur. Ce système possède une grande capacité d'évacuation de la chaleur, qui est d'environ 1 % PP.

Le drainage partiel du CC (en aval du niveau du collecteur) à des fins d'entretien peut également être effectué dans certains réacteurs par les systèmes de refroidissement direct à l'arrêt (ou systèmes de refroidissement pour l'entretien).

Les chaînes d'évacuation de la chaleur représentative sont illustrées à la figure 3.12.

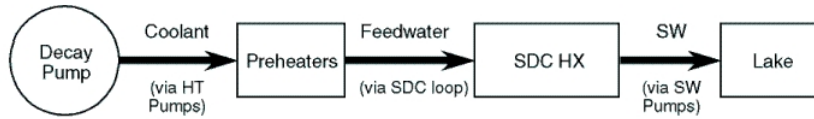
(a) Direct Shutdown Cooling (SDC) System



% Reactor Thermal Power

≤3%

(b) (i) Indirect Shutdown Cooling (SDC) System



≤3%

(b) (ii) Maintenance Cooling System (MCS) for Indirect Shutdown Cooling



≤1%

Figure 3.12
Chaînes d'évacuation de la chaleur

(a) Direct Shutdown Cooling (SDC) System	Circuit de refroidissement direct à l'arrêt (CRDA)
Decay	Désintégration
Coolant (via SDC Pumps)	Caloporteur (par les pompes CRDA)
SDC HX	Échangeur de chaleur du CRDA
SW (via SW Pumps)	ES (par les pompes ES)
Lake	Lac
% Reactor Thermal Power	% de puissance thermique du réacteur
(b) (i) Indirect Shutdown Cooling (SDC) System	Circuit de refroidissement indirect à l'arrêt (CRDA)
Decay Pump	Pompe de désintégration
Coolant (via HT Pumps)	Caloporteur (par les pompes CC)
Preheaters	Préchauffeurs
Feedwater (via SDC loop)	Eau d'alimentation (par la boucle CRDA)
SDC HX	Échange de chaleur CRDA
SW (via SW Pumps)	ES (par les pompes ES)
Lake	Lac
(b) (ii) Maintenance Cooling System (MCS) for Indirect Shutdown Cooling	Circuit de refroidissement pour l'entretien (SRE) pour le refroidissement indirect à l'arrêt
Decay	Désintégration
Coolant (via MCS Pumps)	Caloporteur (par les pompes SRE)

MCS HX	Échangeur de chaleur du SRE
Service Water (SW) (via SW Pumps)	Eau de service (ES) (par les pompes ES)
Lake	Lac

Refroidissement par rejet de vapeur

Pour les deux types de systèmes (direct et indirect), le refroidissement initial du CC à partir de l'exploitation pleine puissance (c.-à-d. à partir de 300 °C jusqu'à environ 150 à 165 °C) est habituellement assuré par le contrôle de la pression du générateur de vapeur (CPGV) à l'aide de la décharge de vapeur vers l'atmosphère ou le condenseur. Le système de refroidissement à l'arrêt continue ensuite le refroidissement.

Il convient de noter que le refroidissement par rejet de vapeur pourrait (théoriquement) se poursuivre à près de 100 °C à mesure que la pression du générateur de vapeur diminue, mais cela n'est pas souhaitable (étant donné que le volume de vapeur produit serait énorme). À mesure que la température diminue, le taux de refroidissement du CC diminue également en raison de la différence de température entre le CC et les générateurs de vapeur. L'écoulement de vapeur volumétrique importante produite lorsque la pression du générateur de vapeur est plus faible risque de bloquer les vannes de rejet de vapeur et de limiter le taux de refroidissement. Cela pourrait causer un séjour trop long dans la plage de température et entraîner une fissuration par hydruration retardée des tubes de force.

Système de refroidissement direct à l'arrêt

Description du système

Un système de type courant est illustré à la figure 3.13 et comprend un agencement de pompe et d'échangeur de chaleur en parallèle avec le trajet d'évacuation de la chaleur à la pleine puissance. Le nombre de refroidisseurs à l'arrêt varie d'un endroit à l'autre, mais on compte au moins toujours deux boucles de refroidissement à chaque endroit. À noter que la direction de l'écoulement normal dans le réacteur est maintenue par les pompes de refroidissement à l'arrêt. Il n'y a aucune redondance des pompes de refroidissement à l'arrêt (dans une boucle), étant donné que l'écoulement de refroidissement à l'arrêt total se situe environ entre 10 à 15 % de l'écoulement principal du circuit. L'écoulement de refroidissement à l'arrêt adéquat est maintenu alors qu'une seule boucle de refroidissement à l'arrêt n'est pas disponible.

Dans un refroidissement contrôlé, la capacité d'évacuation de la chaleur est d'environ 1 à 3 % de la pleine puissance du réacteur.

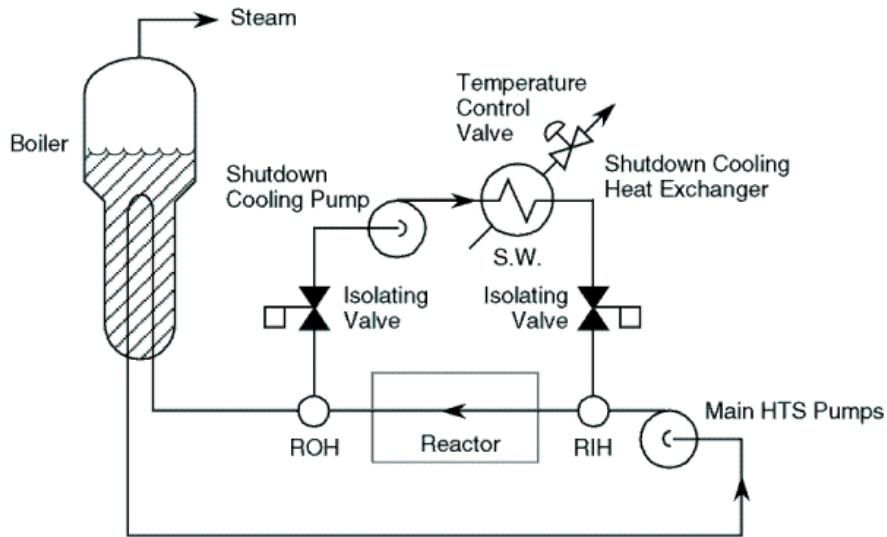


Figure 3.13
Système de refroidissement direct à l'arrêt simplifié

Steam	Vapeur
Boiler	Générateur de vapeur
Temperature Control Valve	Vanne de contrôle de la température
Shutdown Cooling Pump	Pompe de refroidissement à l'arrêt
S.W.	ES
Isolating Valve	Vanne d'isolement
Shutdown Cooling Heat Exchanger	Échangeur de chaleur du refroidissement à l'arrêt
ROH	Collecteur de sortie du réacteur
Reactor	Réacteur
RIH	Collecteur d'entrée du réacteur
Main HTS Pumps	Pompes principales du CC

Fonctionnement courant

Lorsque le réacteur est en régime de puissance, les vannes d'isolement du refroidissement à l'arrêt seront fermées. Les boucles de refroidissement à l'arrêt seront remplies de D₂O pressurisé par les petites conduites du collecteur de sortie du réacteur. Les boucles de refroidissement à l'arrêt sont également réchauffées à une température s'approchant de la température du CC grâce à des conduites de réchauffement du CC (qui ne sont pas illustrées sur le schéma), avant d'être lentement admis par les vannes. Cela permet d'éviter des chocs thermiques dans le circuit.

Lors du refroidissement du circuit CC suite à un arrêt du réacteur, le système de refroidissement à l'arrêt sera utilisé pour refroidir le CC en faisant passer sa température de ~165 °C à 60 °C (à noter que le refroidissement à partir de la température de fonctionnement jusqu'à ~165 °C se fait par rejet de vapeur). Le contrôle de la température du système de refroidissement à l'arrêt est assuré par le contrôle automatique d'écoulement d'eau de service par les échangeurs de chaleur (dans certaines centrales, 2 ou 4 pompes de circulation principales du CC continueront de fonctionner jusqu'à ce qu'une température plus basse soit atteinte dans le circuit. Le refroidissement à l'arrêt peut ensuite se poursuivre alors que les pompes CC seront fermées).

À noter qu'il est important de mettre en place un écoulement d'eau de refroidissement avant de mettre le système en service. Si cela n'est pas fait, il pourrait y avoir ébullition du côté de l'eau de refroidissement de l'échangeur de chaleur. Lorsque l'écoulement d'eau de refroidissement est en place, les poches de vapeur éclateront (en raison de la condensation), ce qui risque de causer des coûts de béliet.

Système de refroidissement indirect à l'arrêt

Description du système

Des préchauffeurs externes sont utilisés dans certaines centrales pour assurer la présence d'un D₂O plus froid dans la zone intérieure du réacteur, lorsque les différences de température de canal (ΔT) sont plus élevées que dans la zone extérieure. Dans d'autres centrales, on utilise un débit de caloporteur accru dans les canaux avec des puissances de canal plus élevées (zone intérieure).

Dans les centrales dotées de préchauffeurs externes, le caloporteur qui circule dans les canaux de la zone intérieure, et qui est déjà passé par les tubes des générateurs de vapeur, est dirigé dans les tubes des

préchauffeurs. C'est à cet endroit qu'il rejette une chaleur additionnelle afin de préchauffer l'eau d'alimentation du générateur de vapeur côté calandre. Ainsi, le prérefroidissement du D₂O du CC (pour la zone intérieure du cœur) et le préchauffage de l'eau d'alimentation du générateur de vapeur sont effectués dans le préchauffeur.

Le circuit de base pour le refroidissement indirect est illustré à la figure 3.14. Il est un peu plus complexe que le système de refroidissement direct parce que deux points d'échange de chaleur sont requis (se reporter à la figure 3.12). Le trajet d'évacuation de la chaleur initial se fait du D₂O du CC vers l'eau d'alimentation du générateur de vapeur dans les préchauffeurs, et le deuxième échange de chaleur se fait de l'eau d'alimentation du générateur de vapeur vers l'eau de service dans les refroidisseurs à l'arrêt (échangeurs de chaleur).

À noter que le système doit évacuer la chaleur d'entrée dans le CC par les pompes CC principales, de même que la chaleur de désintégration. Cela augmente la capacité d'évacuation de la chaleur à ~3 % PP.

Habituellement, le système comporte deux échangeurs de chaleur de 50 % et deux pompes de 100 %. L'alimentation électrique de catégorie III est habituellement utilisée pour constituer une source d'alimentation fiable dans le but de refroidir le combustible.

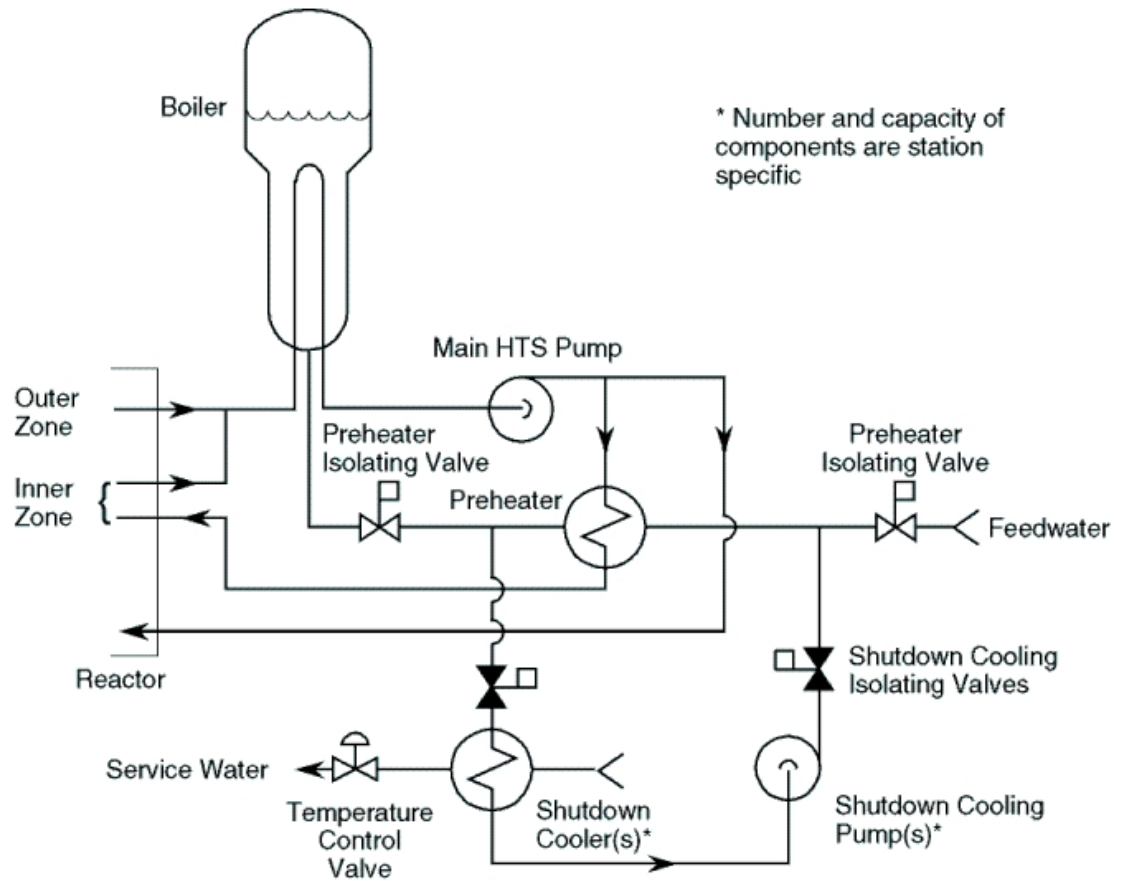


Figure 3.14
Système de refroidissement indirect à l'arrêt de type courant

Boiler	Générateur de chaleur
*Number and capacity of components are station specific	*Le nombre et la capacité des composants sont propres à chaque centrale
Main HTS Pump	Pompe principale du CC
Outer Zone	Zone extérieure
Inner Zone	Zone intérieure
Preheater Isolating Valve	Vanne d'isolement du préchauffeur
Preheater	Préchauffeur
Feedwater	Eau d'alimentation
Reactor	Réacteur
Shutdown Cooling Isolating Valves	Vannes d'isolement du refroidissement à l'arrêt
Service Water	Eau de service
Temperature Control Valve	Vanne de contrôle de la température
Shutdown Cooler(s)*	Refroidisseur(s)* à l'arrêt
Shutdown Cooling Pump(s)*	Pompe(s)* de refroidissement à l'arrêt

Fonctionnement courant

Lorsque le réacteur est en régime de puissance, la boucle de refroidissement à l'arrêt est maintenue à l'état dépressurisé froid et isolée des préchauffeurs. Le circuit doit être rempli et aéré avant son utilisation, afin d'éviter les coups de bélier dus aux masses d'eau qui entrent dans le circuit.

Comme dans le cas du système de refroidissement direct, le système de refroidissement indirect fait habituellement passer la température du CC de ~ 165 °C à 60 °C.

Le système est mis en marche en ouvrant les vannes d'isolement du refroidissement indirect. Le contrôle de la température du CC est assuré par une vanne de contrôle de la température sur la conduite d'eau de service vers l'échangeur de chaleur.

Il est important de maintenir la partie du système contenant l'eau d'alimentation pressurisée. Si on ne fait pas cela, il risque d'y avoir ébullition dans le système. Les poches de vapeur qui se sont formées pourraient éclater lorsque la vapeur se condense dans l'échangeur de chaleur, ou lorsque le système est pressurisé rapidement, ce qui pourrait entraîner des coups de bélier.

À noter que les pompes du CC doivent demeurer en opération afin de faire circuler le D₂O dans les préchauffeurs. Étant donné que le CC est pressurisé lorsque les pompes principales fonctionnent, l'état final du CC lors du refroidissement à l'arrêt est froid et pressurisé.

La perte des pompes principales du CC durant un refroidissement donne lieu à une évacuation inadéquate de la chaleur par les préchauffeurs en raison de la perte de circulation du caloporteur. Le phénomène de thermosiphon est requis pour évacuer la chaleur qui a été enlevée du préchauffeur jusqu'à ce que le refroidissement pour l'entretien soit effectué.

Système de refroidissement pour l'entretien

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, le système de refroidissement indirect à l'arrêt ne convient que pour amener le CC à l'état pressurisé froid (en faisant passer la température du CC de ~ 60 °C à ~ 30 °C).

Le système de refroidissement pour l'entretien est utilisé pour amener le CC à l'état pressurisé froid.

Si l'entretien exige que le CC soit dépressurisé ou partiellement drainé vers les collecteurs, ou que l'on doit effectuer des travaux d'entretien dans le circuit d'eau d'alimentation, il faut assurer une forme quelconque de refroidissement. Le système de refroidissement pour l'entretien répond à ces exigences. Il s'agit d'un schéma simplifié de la figure 3.15. À noter qu'une seule boucle est utilisée. Cette boucle se trouve physiquement à un niveau assez bas afin de permettre le drainage partiel du circuit caloporteur vers le niveau du collecteur. Le système peut également refroidir le CC après un refroidissement CPGV dans les situations d'urgence (si le refroidissement à l'arrêt n'est pas disponible).

Durant le fonctionnement normal du système, le système de refroidissement pour l'entretien est isolé du CC.

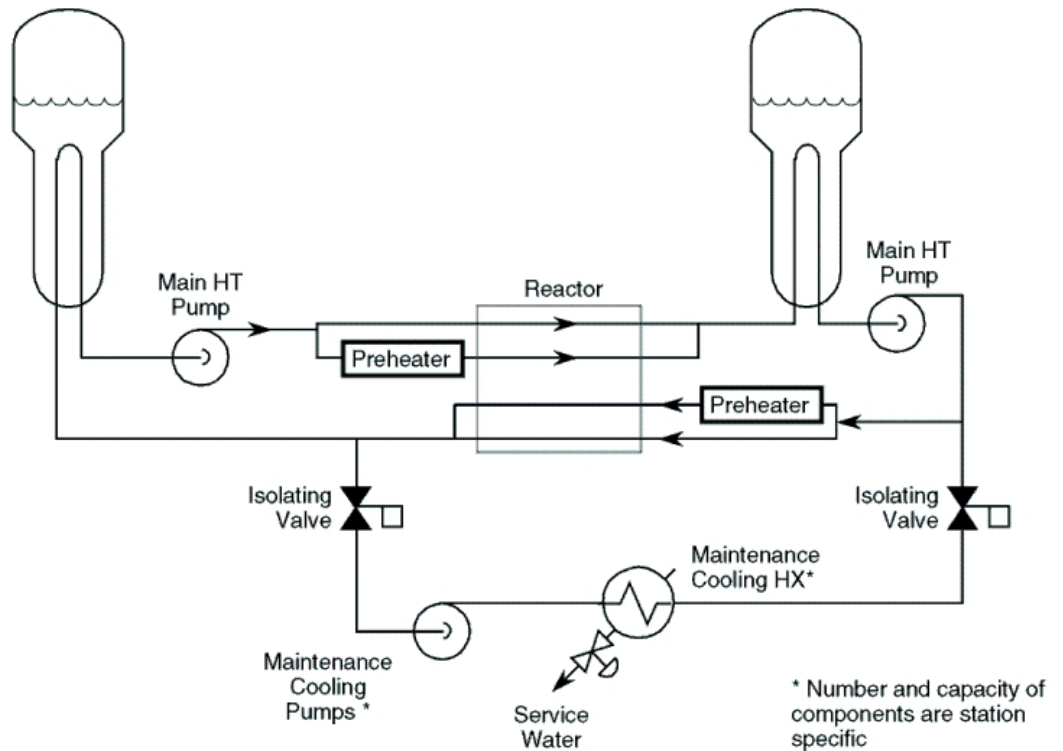


Figure 3.15

Système de refroidissement pour l'entretien de type courant

Main HT Pump	Pompe principale du CC
Preheater	Préchauffeur
Reactor	Réacteur
Isolating Valve	Vanne d'isolement
Maintenance Cooling HX*	Échangeur de chaleur du système de

	refroidissement pour l'entretien*
Maintenance Cooling Pumps*	Pompes de refroidissement pour l'entretien*
Service Water	Eau de service
*Number and capacity of components are station specific	*Le nombre et la capacité des composants sont propres à chaque centrale

3.3.2 *Notions principales*

- Le CC doit être disponible en tout temps afin d'évacuer la chaleur de désintégration des produits de fission provenant du combustible. Les sources d'alimentation électrique des systèmes qui refroidissent le réacteur lorsqu'il est à l'arrêt sont habituellement de catégorie III, afin d'assurer une alimentation fiable.
- Les systèmes de refroidissement direct refroidissent le D₂O du CC lorsque le réacteur est à l'arrêt. Les systèmes de refroidissement indirect refroidissent l'eau d'alimentation, qui refroidit indirectement le D₂O du CC dans le préchauffeur.
- Le système de refroidissement à l'arrêt doit évacuer la chaleur de désintégration afin de faire passer la température du CC de ~165 °C à ~60 °C. L'état final du refroidissement à l'arrêt est froid et pressurisé. Les exigences relatives à l'évacuation de la chaleur sont de ~1 à 3 % de la pleine puissance du réacteur lors d'un refroidissement contrôlé. Dans le cas des systèmes de refroidissement direct, le réacteur peut être dépressurisé afin de permettre l'entretien du système.
- Le système de refroidissement pour l'entretien doit évacuer la chaleur de désintégration afin de faire passer la température du CC de ~60 °C à ~30 °C. L'état final du refroidissement pour l'entretien est froid et dépressurisé (et possiblement drainé aux niveaux des collecteurs). Les exigences relatives à l'évacuation de la chaleur sont de ~1 % de la pleine puissance.
- Le système de refroidissement pour l'entretien permet de refroidir le circuit caloporteur après un refroidissement par rejet de vapeur.

3.3.3 *Thermosiphon*

Pendant le fonctionnement à pleine puissance, l'alimentation électrique de catégorie IV est requise pour faire fonctionner les pompes de

circulation principales du CC et les pompes d'alimentation du générateur de vapeur afin de s'assurer que le transfert de chaleur et l'évacuation sont effectués. S'il y a panne de catégorie IV, la capacité de transfert de chaleur à pleine puissance est également perdue et le réacteur s'arrêtera soit pendant un faible écoulement dans le CC ou pendant que la pression est élevée dans le CC (en raison du gonflement du caloporteur, car la température du D₂O dans le CC augmente).

Après une panne de catégorie IV et un arrêt consécutif du réacteur, une partie de la circulation dans le CC sera maintenue par inertie des moteurs/volants d'inertie pendant 2 à 3 minutes. Cette circulation, bien que réduite, continue à transporter la chaleur du combustible vers les générateurs de vapeur. Pendant cette période, l'entrée de chaleur totale (fission, désintégration et chaleur de pompe résiduelle) est réduite à environ 3 % de la pleine puissance. La source froide finale est habituellement la décharge de vapeur vers l'atmosphère grâce aux VRV ou aux VDVA (selon les centrales).

Suite au ralentissement des moteurs et des volants d'inertie, la chaleur peut encore être transportée vers le générateur de vapeur grâce à un processus de convection naturelle appelé « thermosiphon ».

La mise sous cocon d'un réacteur CANDU permet de s'assurer que les générateurs de vapeur sont à un niveau plus élevé que le réacteur. L'action de refroidissement dans le générateur de vapeur augmente la masse volumique du caloporteur (D₂O), ce qui fait en sorte qu'il redescend vers le réacteur. Cela oblige le D₂O chaud, à plus faible masse volumique, à monter du réacteur vers le générateur de vapeur. Un écoulement continu est ainsi établi.

Le refroidissement peut être maintenu indéfiniment par ce processus en autant que les critères suivants soient respectés :

1. La puissance du réacteur doit être limitée à 3 % PP ou moins (c.-à-d. aux niveaux de la chaleur de désintégration).
2. Le contrôle de la pression du générateur de vapeur permet de maintenir le ΔT entre le D₂O du CC et l'eau du générateur de vapeur. Cela permet de s'assurer que les différences de masse volumique dans le D₂O du CC soient maintenues afin de diriger les écoulements du thermosiphon.
3. Une source froide dans le générateur de vapeur est disponible, c.-à-d. les VRV ou VDVA en plus de l'approvisionnement garanti de l'eau d'alimentation du générateur de vapeur (qui

nécessite une alimentation de catégorie III pour la pompe d'alimentation auxiliaire du générateur de vapeur et un CNGV pour maintenir le niveau du générateur de vapeur au-dessus des grappes de combustible).

4. Le contrôle de la pression et de l'inventaire dans le CC est opérationnel. Si la pression dans le CC ne peut pas être maintenue, il risque d'y avoir ébullition dans les collecteurs de sortie du réacteur. S'il y a ébullition excessive, l'écoulement pourrait ne pas pouvoir être maintenu en deux phases (liquide et vapeur).

Les trajets de transfert de chaleur suite à une panne de catégorie IV et dans des conditions de thermosiphon sont illustrés à la figure 3.16.

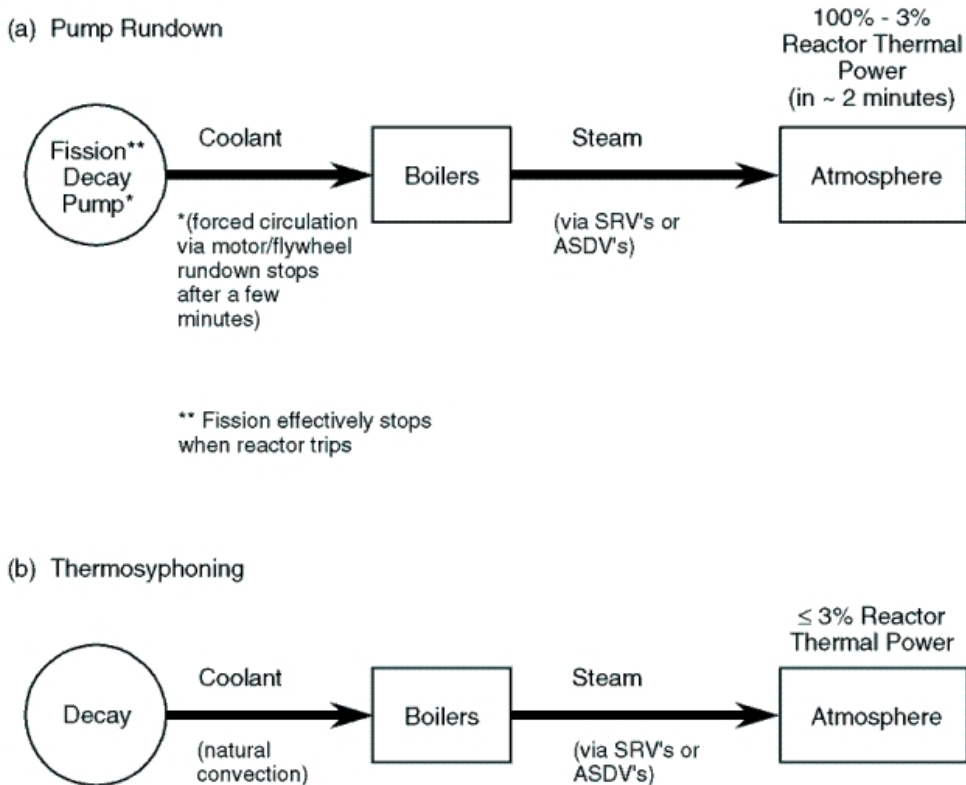


Figure 3.16 – Transfert de chaleur suite à une panne de catégorie IV

(a) Pump Rundown	a) Ralentiement des pompes
Fission** Decay Pump*	Pompe du réservoir de désintégration par fission**

Coolant	Caloporteur
Boilers	Générateurs de vapeur
*(forced circulation via motor/flywheel rundown stops after a few minutes)	* (circulation forcée par des moteurs ou des volants d'inertie cessant après quelques minutes)
Steam	Vapeur
(via SRV's or ASDV's)	(par les VRV ou VDVA)
100% - 3% Reactor Thermal Power (in ~2 minutes)	Puissance thermique du réacteur 100 % à 3 % (en ~2 minutes)
Atmosphere	Atmosphère
** Fission effectively stops when reactor trips	** La fission cesse efficacement lorsque le réacteur est mis à l'arrêt
(b) Thermosyphoning	b) Thermosiphon
Decay	Désintégration
Coolant	Caloporteur
(natural convection)	(convection naturelle)
Boilers	Générateurs de vapeur
Steam	Vapeur
(via SRV's or ASDV's)	(par les VRV ou les VDVA)
≤ 3% Reactor Thermal Power	≤ 3 % de la puissance thermique du réacteur
Atmosphere	Atmosphère

3.3.4 Refroidissement rapide

Le refroidissement rapide est une procédure qui fait baisser rapidement la température du circuit caloporteur suite à une excursion du système.

La pression du générateur de vapeur (et par conséquent la température du générateur) est diminuée rapidement par une décharge de vapeur à l'atmosphère à l'aide des vannes de rejet de vapeur ou de vannes de sûreté instrumentées. Cette réduction rapide de la température du générateur de vapeur entraînera une augmentation correspondante du taux de transfert de chaleur du CC en raison de la ΔT importante, ce qui fera baisser rapidement sa température.

Cette procédure assujettira les composantes du système à des contraintes thermiques extrêmes. Un refroidissement rapide (où toute la vapeur disponible est rejetée à l'atmosphère) pourrait habituellement être fait en cas d'APRP. Pour les autres excursions du réacteur, qui pourraient nécessiter un refroidissement rapide du CC, un refroidissement suffisamment rapide pourra être effectué sans nécessité la décharge de toute la vapeur par les vannes en fonction.

Le trajet de transfert de chaleur pour le refroidissement rapide est illustré à la figure 3.17

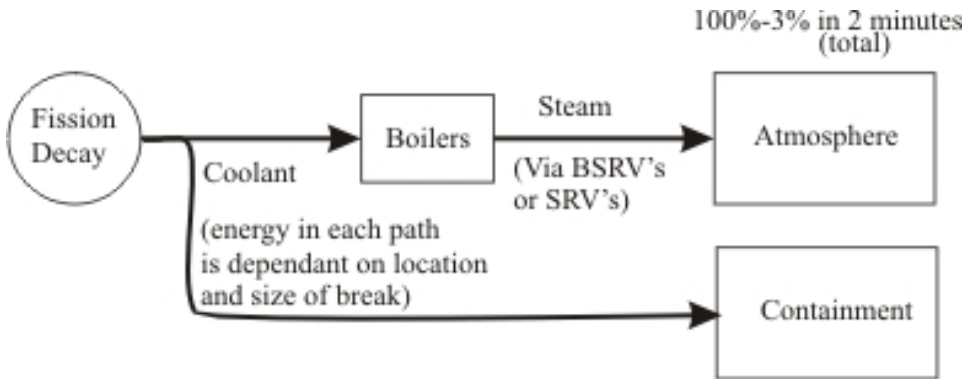


Figure 3.17
Trajet de transfert de chaleur en cas de refroidissement rapide

Fission Decay	Désintégration par fission
Coolant	Caloporteur
Boilers	Générateurs de vapeur
Steam	Vapeur
Atmosphere	Atmosphère
(Via BSRV or SRV's)	(par les VDVS ou les VDV
Containment	Confinement
(energy in each path is dependant on location and size of break)	(l'énergie dans chaque trajet dépend de l'emplacement et de la taille de la brèche)

3.3.5 Refroidissement d'urgence à l'aide du refroidissement à l'arrêt

Si le refroidissement normal à l'aide du CPGV n'est pas disponible, ou qu'il n'est pas souhaitable en raison d'un nombre important de fuites de tubes de générateur de vapeur, le refroidissement d'urgence du CC (immédiatement après un arrêt) peut se faire seulement à l'aide des refroidisseurs à l'arrêt en ouvrant les vannes du circuit sans réchauffement préalable.

Le système est conçu pour supporter le choc thermique qui accompagne cette procédure, mais pour un nombre limité de fois seulement. Des réparations plus longues, des inspections ou le remplacement de l'équipement seront requis si cette limite est atteinte.

Suite à un refroidissement d'urgence, une inspection exhaustive des refroidisseurs à l'arrêt doit être effectuée et l'on doit vérifier l'intégrité des plaques.

L'exigence relative à la capacité maximale normale des refroidisseurs à l'arrêt pendant un refroidissement d'urgence est ~6 à 7 % de la puissance thermique totale du réacteur.

Dans les centrales qui utilisent un système de refroidissement pour l'entretien, ce système peut être mis en service à ~ 160 °C en cas d'urgence. Cela se produit parfois lorsque le système de refroidissement à l'arrêt n'est pas disponible pour l'entretien pendant le refroidissement. Ce refroidissement peut être effectué à une pression adéquate du CC afin de satisfaire les exigences relatives à la hauteur d'aspiration positive de la pompe de refroidissement pour l'entretien et des inspections exhaustives du système qui suivront.

3.3.6 *Notions principales*

Le phénomène de thermosiphon se fait par convection naturelle entre le réacteur et les générateurs de vapeur. Dans les générateurs de vapeur, le D₂O est refroidi par l'eau du générateur de vapeur puis retourne au réacteur en raison de la masse volumique accrue du D₂O. Le D₂O chaud est entraîné de force dans les générateurs de vapeur où de la chaleur additionnelle peut être évacuée. Cette méthode d'évacuation de la chaleur permet d'éliminer ~ 3 % de la chaleur produite par l'exploitation du réacteur à pleine puissance.

Quatre conditions sont requises pour maintenir le thermosiphon :

- Puissance du réacteur ≤ 3 % PP (chaleur de désintégration);
- Le CPGV est en fonction pour maintenir ΔT entre le D₂O du CC et l'eau du générateur de vapeur dans les générateurs de vapeur;
- Les VDV ou VDVA sont disponibles en plus de l'eau d'alimentation pour le rejet de vapeur;
- Le système de contrôle de la pression et de l'inventaire du CC est disponible afin d'éviter l'ébullition dans le CC.

Les refroidissements d'urgence sont possibles lorsque l'on place le système de refroidissement d'urgence en service à des températures élevées. Le fait de mettre en service le système de refroidissement d'urgence soumet le système à des contraintes thermiques élevées. Des inspections des composantes sont requises suite au refroidissement d'urgence. Le nombre de refroidissements d'urgence pouvant être effectué par le système est limité. La capacité du système requise est environ ~ 7 % de la pleine puissance du réacteur.

Le refroidissement rapide est une réduction rapide de la température du CC causée par la décharge de grande quantité de vapeur dans l'atmosphère, en provenance des générateurs de vapeur.

3.4 Eau lourde du CC

Une caractéristique importante du réacteur CANDU est l'utilisation d'eau lourde (D_2O) comme modérateur et caloporteur. La présente section porte sur le caloporteur du CC et sur les exigences relatives à la qualité et aux normes se rapportant au D_2O . Nous verrons également les dangers radiologiques associés au caloporteur du CC.

3.4.1 Limites de la teneur isotopique

La qualité du D_2O s'exprime habituellement sous la forme d'un pourcentage de D_2O et de H_2O , c.-à-d. la teneur isotopique.

Pour le fonctionnement quotidien d'un réacteur CANDU, une limite inférieure est imposée à la teneur isotopique du caloporteur (D_2O). Cette limite inférieure est établie pour deux raisons fondamentales, soit des raisons économiques et des raisons relatives à la sûreté.

Raisons économiques

Bien que le caloporteur joue un rôle peu important dans la thermalisation des neutrons rapides, le H_2O dans le caloporteur affecte directement la quantité de neutrons absorbés et, par conséquent, éliminés du cycle neutronique. Par exemple, il est probable qu'avec une teneur isotopique de 90 % dans le CC (c.-à-d. 10 % de H_2O), le SRR (système de régulation du réacteur) réussisse à maintenir la criticité. Cependant, cela nécessiterait davantage de combustible. Cette pénalité relative au combustible doit être compensée par une production plus importante et des coûts associés.

Raisons relatives à la sûreté

Du point de vue de la sûreté, les exigences relatives à la teneur isotopique sont associées au potentiel de vidage du CC et des effets connexes sur la réactivité, particulièrement suite à un APRP.

La présence de H_2O dans le caloporteur augmente l'absorption des neutrons. Le maintien de la criticité exige l'addition d'une valeur de réactivité (c.-à-d. baisse des niveaux de zone, etc.).

Au début d'un APRP, la pression dans le canal de combustible est réduite, ce qui donne lieu à de l'ébullition et à la formation de vides. Les neutrons qui avaient déjà été absorbés sont maintenant disponibles pour la fission. La réactivité positive augmentera rapidement. Ainsi, le SRR ou les systèmes spéciaux de sûreté doivent maintenir la teneur isotopique du caloporteur à un niveau tel que les neutrons en excès qui sont disponibles suite au vidage sont contrôlés. La valeur de la teneur

isotopique minimale normale est fixée par les *Lignes de conduite pour l'exploitation* et se situe entre ~97,5 % et ~98,5 %.

Par exemple, on a calculé qu'un réacteur CANDU de type courant (600 MW) exploité avec un combustible à l'équilibre et du modérateur ainsi qu'une teneur isotopique de ~99,7 % dans le CC pourrait subir une augmentation de réactivité allant jusqu'à 10 mk, selon le degré de vidage.

Dans la plupart des centrales, une limite supérieure pour la teneur isotopique du circuit caloporteur existe également pour des raisons de sûreté. La limite supérieure de la teneur isotopique dans le CC limite le taux et l'ampleur de la réactivité positive insérée durant un APRP dans le cœur. Cette limite supérieure s'exprime habituellement comme la différence minimum entre la teneur isotopique dans le CC et la teneur isotopique du modérateur, cette dernière étant la plus élevée des deux.

Par exemple, disons qu'un réacteur est en cours d'exploitation et qu'un APRP survient alors que la teneur isotopique du D₂O est élevée dans le modérateur. Tout poison neutronique (p. ex. le bore) présent dans le modérateur sera déplacé ou dilué. Cela risque de faire augmenter la réactivité, étant donné que les neutrons qui avaient été précédemment absorbés par les poisons sont maintenant disponibles pour la fission. Les limites précisées pour votre centrale dépendent de la teneur maximale en bore (ou l'équivalent poison) permis (p. ex. réactivité en excès pour le chargement de combustible à venir), conception du réacteur, teneur isotopique du modérateur et capacité du système d'arrêt d'urgence (qui protège contre les APRP dans le cœur lorsque le réacteur est à l'arrêt et non à l'EAG).

3.4.2 Baisse de la teneur isotopique du D₂O dans le CC

Les mécanismes suivants permettent de faire baisser la teneur isotopique du D₂O dans le CC pendant le fonctionnement normal. Tous ces mécanismes sont imputables à l'entrée ou la formation de H₂O.

1. Additions accidentelles de D₂O d'appoint à plus faible teneur isotopique ou de retours de collecte
2. Utilisation inadéquate de résines échangeuses d'ions dans le circuit d'épuration du CC
3. Addition d'hydrogène au CC (sera examiné plus loin)

4. H₂O provenant de fuite d'air vers le circuit de collecte du D₂O du CC et vers le réservoir de stockage (particulièrement si les circuits sont ouverts pour l'entretien).

Les deux premières sources peuvent être potentiellement des sources importantes de baisse de la teneur isotopique. Les deux dernières produiront des baisses faibles mais continues de la teneur isotopique.

Le tableau 3.1 illustre les effets prévus à court et à long terme découlant des changements de la teneur isotopique du D₂O.

Tableau 3.1
Effets des changements de la teneur isotopique sur l'exploitation

Changement de la teneur isotopique dans le CC Entre 97 % et 100 %	Effet immédiat sur le réacteur exploité à pleine puissance	Effet à long terme sur le réacteur exploité à pleine puissance
1. La teneur isotopique augmente lentement en raison des additions de D ₂ O à teneur isotopique normale ou augmentée pour l'appoint (environ 0,05 % max/mois)	Aucun effet observable, le changement de la teneur isotopique est trop faible	Taux de chargement de combustible (grappes/semaine) diminue légèrement. Taux de combustion supérieur à la moyenne.
2. Baisse soudaine de la teneur isotopique de ≤ 3 % jusqu'à la teneur isotopique la plus faible permise par les <i>Lignes de conduite pour l'exploitation</i> .	L'exploitation se poursuit avec une baisse du niveau de zone liquide moyen (les barres de compensation peuvent être retirées).	Taux de chargement de combustible accru pour ramener (et maintenir) les niveaux de zone/les barres de compensation à leurs positions normales pour l'exploitation. Taux de combustion moyen plus faible.
3. Baisse soudaine de la teneur isotopique jusqu'à une valeur inférieure à la limite précisée en (2).	Comme précédemment, à moins que la baisse de Δk soit suffisamment importante pour rendre le réacteur sous-critique.	Le réacteur doit être mis à l'arrêt jusqu'à ce que la teneur isotopique dans le CC soit disponible.

3.4.3 Dangers radiologiques

La gestion et le contrôle de l'inventaire du caloporteur dans le CC doit également tenir compte des dangers radiologiques qui sont présents dans différentes conditions d'exploitation.

Pendant le fonctionnement normal, le caloporteur contient :

1. Des produits d'activation du caloporteur : tritium, azote 16 (N^{16}), oxygène 19 (O^{19}).
2. Des produits de fission (la source principale en étant le combustible défectueux) :
 - a. Des produits de fission halogènes, principalement de l'iode 131 (I^{131});
 - b. D'autres produits de fission gazeux (principalement des gaz rares).
3. Des produits de corrosion radioactifs : principalement des isotopes métalliques créés par une combinaison de radioactivité et de corrosion dans les composants du CC.

Les produits de corrosion radioactifs se répartissent autour du circuit et tendent à se déposer habituellement autour des coudes de conduite et des vannes. Les rayons gamma seront capables de traverser les conduites, ce qui cause un danger de dose externe pendant l'exploitation et lors de la mise à l'arrêt. Certains de ces produits de corrosion émettent également des particules β . Cela ne présente aucun danger d'irradiation β externe s'il y a des fuites de D_2O hors du circuit CC, car cela permet aux matières de quitter le circuit. Les dangers sont grandement réduits lorsque l'on effectue l'entretien des composants du circuit (p. ex. à proximité des composants ou dans le circuit ouvert).

La plupart des produits de fission gazeux (gaz rares) sont des produits à courte période radioactive et se désintègrent à de très faibles niveaux en un jour ou moins, et pour cette raison, il ne constitue un risque que pendant l'exploitation. Il contribue à la dose externe, comme nous l'avons mentionné précédemment. En plus de ces produits, certains gaz rares, en concentrations élevées, peuvent causer des dangers d'irradiation externes β , en raison de la désintégration (β - γ).

Iode 131 a une période de ~ 8 jours. D'autres isotopes de l'iode radioactif se désintègrent en un jour ou moins. La source de l'iode radioactif est le combustible défectueux. Les colonnes échangeuses

d'ions dans le circuit d'épuration du CC éliminent l'iode du circuit, mais une certaine quantité d'iode demeure présente. Toute fuite de caloporteur hors du circuit CC libère du I^{131} , ce qui peut donner lieu à une incorporation chez le personnel de centrale.

Dans des conditions normales (lorsque le caloporteur est contenu à l'intérieur du circuit), l'importance de ces dangers radiologiques est réduite quelque peu en raison du blindage assuré par le circuit lui-même. Cependant, le N^{16} et le O^{19} sont produits dans le cœur et ce sont des émetteurs γ de haute énergie, qui présentent un danger d'irradiation γ externe. Il y a également un danger d'exposition au neutron par suite de la désintégration du N^{16} (qui émet des rayons γ de haute énergie, qui réagisse avec le deutérium, ce qui cause une émission de photoneutrons). Ces dangers sont contrôlés dans une certaine mesure étant donné que la majeure partie du CC n'est pas accessible en régime de puissance (c.-à-d. à l'intérieur du confinement, ou l'accès est contrôlé). Suite à une mise à l'arrêt, la formation de produits d'activation cesse et le N^{16} ainsi que le O^{19} se désintègrent rapidement (en quelques minutes) jusqu'à atteindre des niveaux négligeables.

Toute fuite de caloporteur hors du CC présente un danger d'irradiation important. Le danger d'irradiation γ externe existe toujours (en raison de la présence de D_2O dans le CC et de la présence de produits de fission halogènes qui fuient hors du CC, du N^{16} et du O^{19}), mais il est toujours accompagné d'un danger d'exposition au tritium (exposition β interne) et possiblement au I^{131} . À noter que cela s'ajoute aux dangers classiques posés par des liquides chauds et pressurisés.

3.4.4 Notions principales

- Pour le CC, des limites minimales de la teneur isotopique sont fixées pour des raisons économiques et de sûreté concernant le combustible et le réacteur (effets de vidage).
- Le CC possède des limites de la teneur isotopique maximale pour la sûreté du réacteur (protection contre les APRP qui surviennent dans le cœur).
- Les quatre grandes sources de baisse de la teneur isotopique dans le CC sont des additions accidentelles de D_2O à plus faible teneur isotopique, des résines échangeuses d'ions qui ne sont pas deutérisées adéquatement, la formation de H_2O à partir de l'addition de H_2 et l'entrée d'air.

- L'addition de D₂O à plus faible teneur isotopique au CC est une préoccupation importante en raison des conséquences économiques de la baisse de la teneur isotopique.
- Les dangers radiologiques associés au D₂O du CC existent en régime de puissance et à l'arrêt. Les sources de ce danger sont les produits d'activation du caloporteur, les produits de fission halogènes, les produits de fission gazeux et les produits de corrosion radioactifs.
- Lorsque le réacteur est à l'arrêt, les quatre grands dangers radiologiques sont imputables au rayonnement γ externe, au rayonnement β externe, au tritium et au I¹³¹.
- En régime de puissance, il y a deux grands dangers radiologiques additionnels qui sont imputables au rayonnement γ de haute énergie émis par le N¹⁶ et le O¹⁹ et la présence de photoneutrons résultant de la désintégration du N¹⁶.

3.4.5 Circuits de collecte du D₂O du circuit caloporteur

Le D₂O coûte très cher. Des pertes chroniques non récupérées peuvent représenter un fardeau économique dans l'exploitation d'un réacteur. En outre, elle pose des dangers d'irradiation pour le personnel.

Étant donné que la majeure partie du CC fonctionne à pression élevée, la probabilité des fuites est accrue. En fait, certaines pièces d'équipement laissent passer de petites quantités de D₂O pendant le fonctionnement normal (p. ex. les joints de pompe).

Circuit de collecte du D₂O du CC

Ce circuit permet de collecter les fuites normales et prévues du CC. Il comprend un circuit de conduite à boucles fermées raccordées à différents points de collecte de l'équipement.

Les points de collecte habituel sont :

- Les joints de pompe de circulation principale.
- Les drains/conduits d'éventage du refroidisseur de purge.
- Les événements du CC.
- Les garnitures de vannes du CC.

La fuite se fera par gravité vers un réservoir de collecte. Le taux de remplissage du réservoir donne une idée du taux de fuite.

Un circuit de collecte du CC représentatif est illustré à la figure 3.18

Étant donné qu'une bonne partie du D_2O recueilli est chaud, un système de refroidissement est parfois intégré au réservoir de collecte. L'eau de refroidissement passe à travers des conduites immergées dans le réservoir de collecte. Il s'agit d'une source potentielle de baisse de la teneur isotopique du D_2O en cas de fuite des tubes.

Toute vapeur chaude de D_2O est condensée dans un condenseur d'aération et le condensat est retourné au réservoir de collecte. Le condenseur d'aération peut également servir à faire baisser la teneur isotopique du D_2O .

Le réservoir de collecte possède un niveau d'alarme élevé. Lorsque cette alarme est déclenchée, le contenu du réservoir est recirculé par une pompe afin d'assurer le mélange homogène du contenu (des pompes de 2 x 100 % sont habituellement installées), puis il y a prélèvement d'échantillon.

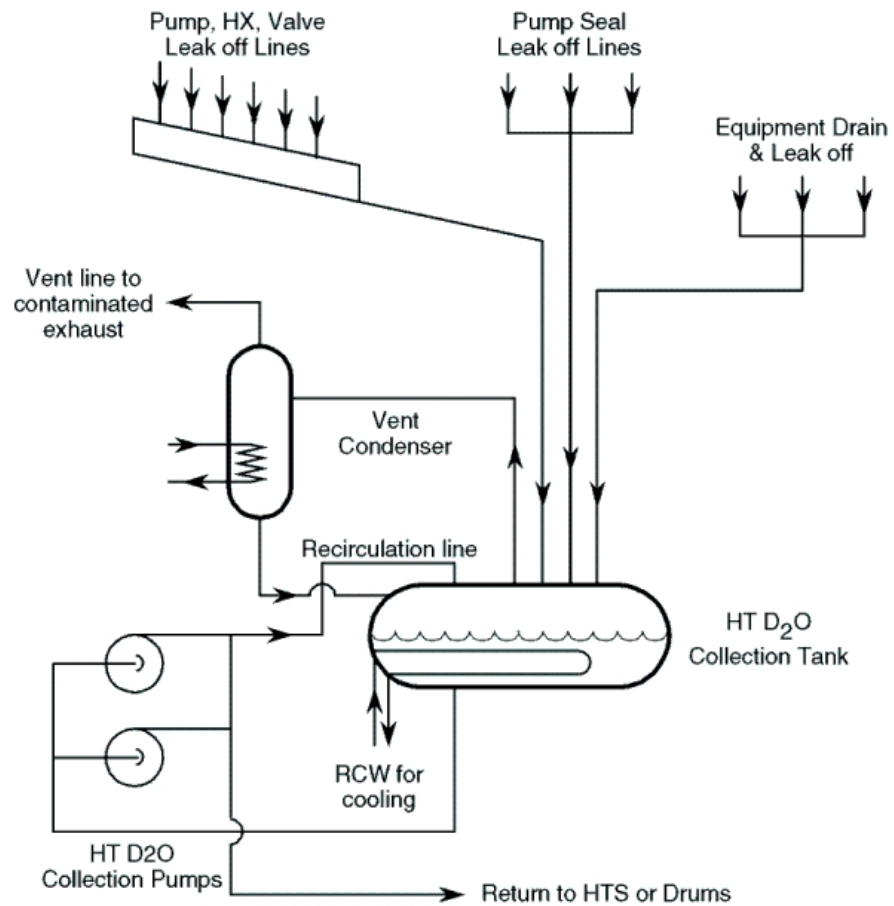


Figure 3.18
Circuit de collecte du D₂O

Pump, HX, Valve Leak off Lines	Pompe, échange de chaleur, vanne Fuites hors des conduites
Pump Seal Leak off Lines	Joint de pompe Fuites hors des conduites
Equipment Drain & Leak off	Drainage et fuite de l'équipement
Vent line to contaminated exhaust	Conduite d'aération vers les rejets contaminés
Vent Condenser	Condenseur d'événage
Recirculation line	Conduite de recirculation
HT D ₂ O Collection Tank	Réservoir de collecte du D ₂ O du CC
RCW for cooling	ERR pour le refroidissement
HT D ₂ O Collection Pumps	Pompes de collecte du D ₂ O du CC
Return to HTS or Drums	Retour vers le CC ou les fûts

L'eau qui fuit vers ce réservoir n'est habituellement pas à faible teneur isotopique. Cependant, avant de retourner au circuit caloporteur, sa teneur isotopique devrait être vérifiée pour s'assurer qu'elle respecte

les exigences minimales de la centrale pour les mêmes raisons économiques et de sûreté mentionnées précédemment. Ce D₂O doit également être exempt de contaminants. Si le D₂O est contaminé, les contaminants ou les produits de corrosion du CC pourraient devenir radioactifs.

Circuit de collecte du D₂O en plusieurs points

Il y a des sources de D₂O aux points de fuite (dans l'ensemble des circuits du réacteur) et ces fuites ne respectent probablement pas les spécifications du retour vers le circuit. Ces points de collecte sont dirigés vers plusieurs points du circuit de collecte de D₂O. Des sources possibles sont le réservoir de collecte du CC, si son contenu dépasse les spécifications, les paliers de la pompe d'alimentation et les sorties contaminées.

Pour ce circuit, le D₂O recueilli est dirigé vers le dispositif d'augmentation de la teneur isotopique ou vers les fûts.

Circuit de récupération de vapeur

Les fuites de D₂O dans l'atmosphère du réacteur forment de la vapeur de D₂O, particulièrement lorsque la température de l'air est supérieure à la température ambiante normale. À noter que la vapeur dans la voûte du réacteur n'est pas exclusivement composée de D₂O, mais qu'elle contient également du H₂O et d'autres composés.

Des ventilateurs d'extraction dirigent la vapeur vers le circuit de récupération de vapeur. Ce circuit comprend habituellement des produits déshydratants qui absorbent la vapeur. Des réchauffeurs régénèrent le produit déshydratant saturé et libèrent la vapeur concentrée vers le condenseur. Le liquide récupéré doit ensuite être retourné au dispositif d'augmentation de la teneur isotopique étant donné qu'il sera ramené en H₂O, etc., dans le liquide. Ce circuit comporte quatre avantages :

1. Il récupère le D₂O coûteux.
2. Il permet de détecter les petites fuites chroniques.
3. Il réduit les niveaux de rayonnement atmosphérique dus au tritium.
4. Le mécanisme d'extraction (par les assécheurs de purge) réduit la pression dans le confinement en l'amenant à une

pression légèrement subatmosphérique, ce qui permet de freiner les fuites vers la centrale et l'environnement.

Une CN de type courant peut posséder plus d'un circuit de récupération de vapeur pour desservir des zones comme la voûte du réacteur, les conduites de la machine de chargement de combustible et les zones de chargement de combustible.

Circuit de récupération de D₂O liquide

Le circuit de récupération de D₂O liquide, installé dans la plupart des centrales, permet au réacteur d'être mis à l'arrêt de manière contrôlée au cas où surviendrait une petite rupture de conduite. Le circuit retourne suffisamment de D₂O au CC pour maintenir le refroidissement dans les canaux de combustible jusqu'à ce que le CC puisse être refroidi et dépressurisé. Une petite rupture indique que la pression dans le CC peut être maintenue, c.-à-d. que la capacité d'entrée du caloporteur vers le CC est supérieure aux pertes de caloporteur.

Dans le cas des petites ruptures du CC, la récupération de D₂O enrayer la nécessité de déclencher le SRUC, car elles ont les effets néfastes suivants :

- baisse importante de la teneur isotopique du caloporteur par suite de l'injection d'eau ordinaire;
- mise à l'arrêt forcé des autres réacteurs dans une centrale à plusieurs réacteurs;
- contraintes thermiques créées par un refroidissement rapide et l'eau froide du SRUC.

Le circuit de base est illustré à la figure 3.19.

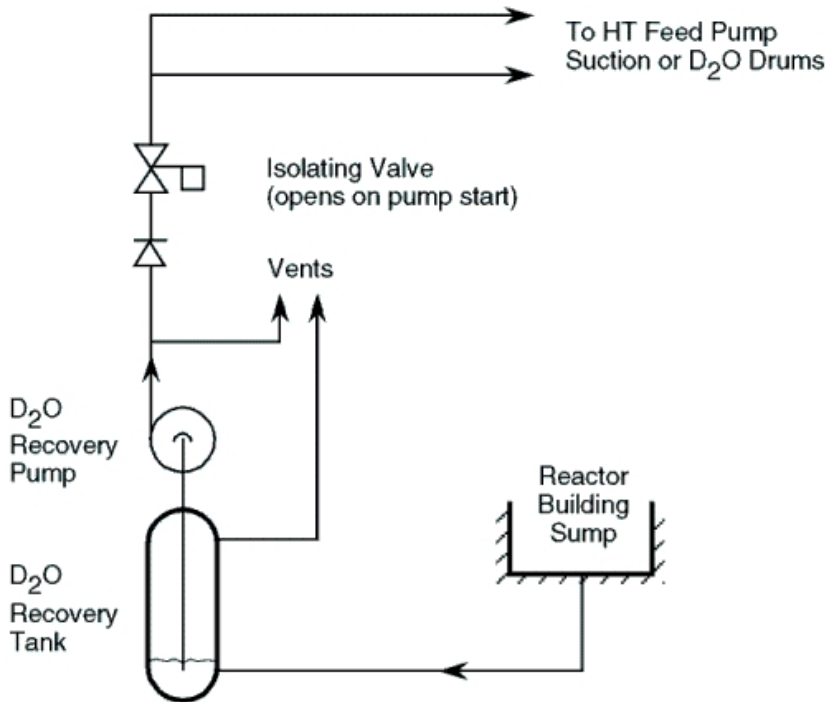


Figure 3.19 – Circuit de récupération du D₂O

To HT Feed Pump Suction or D ₂ O Drums	Vers l'aspiration de la pompe d'alimentation du CC ou les fûts de D ₂ O
Isolating Valve (opens on pump start)	Vanne d'isolement (s'ouvre au démarrage des pompes)
Vents	Évents
D ₂ O Recovery Pump	Pompe de récupération du D ₂ O
D ₂ O Recovery Tank	Réservoir de récupération du D ₂ O
Reactor Building Sump	Puisard du bâtiment réacteur

Le D₂O qui fuit s'écoule par gravité vers un puisard et est ensuite récupéré par un réservoir de récupération, se trouvant à bas niveau dans le bâtiment réacteur. Le D₂O de ce réservoir de stockage peut être pompé soit par aspiration de la pompe d'alimentation du CC ou, si le taux de fuite est suffisamment faible, vers des fûts pour un nettoyage chimique subséquent et une augmentation de la teneur isotopique. Le réservoir de stockage de D₂O du réacteur peut fournir de l'eau d'appoint grâce au lien interracteur (dans les centrales à plusieurs réacteurs).

Si le taux de fuite se situe à l'intérieur de la capacité nominale du circuit, il est peu probable que la vapeur produite par une petite rupture du CC amorce le fonctionnement du confinement. Il est peu probable

que l'augmentation de pression dans le bâtiment réacteur dépasse la valeur seuil du fonctionnement de la VDP du confinement (dans les systèmes de confinement à pression négative).

3.4.6 Notions principales

- Le circuit de collecte du D₂O du CC recueille les fuites en divers points du circuit caloporteur où l'eau recueillie sera probablement conforme aux spécifications de retour au circuit. On doit vérifier la teneur isotopique du D₂O pour les mêmes raisons de sûreté et d'économie que celles mentionnées précédemment. La pureté chimique doit également être vérifiée afin de s'assurer que la corrosion dans le CC et que les produits d'activation des contaminants sont réduits au minimum.
- La collecte du D₂O en plusieurs points permet de recueillir les fuites provenant d'autres points que ceux du circuit caloporteur lorsqu'il est peu probable que l'eau recueillie respecte les spécifications de retour au circuit. Cette eau est placée dans des fûts ou envoyée directement au dispositif d'augmentation de la teneur isotopique.
- Le circuit de récupération de vapeur récupère les vapeurs de D₂O provenant de différents endroits de la centrale, ce qui permet de détecter les petites fuites chroniques, de réduire les niveaux atmosphériques de tritium et de maintenir la pression du confinement sous la pression atmosphérique.
- Le système de récupération de liquide retourne suffisamment de D₂O au CC pour maintenir un inventaire adéquat dans le circuit afin de s'assurer que le refroidissement du combustible est assuré en cas de petite fuite d'une conduite. L'eau est récupérée des puisards à l'intérieur du confinement et risque d'être sale ou à plus faible teneur isotopique.

3.4.7 Fuites de D₂O dans le CC

Les différents circuits de collecte de D₂O et de récupération décrits précédemment peuvent être de bons indicateurs des fuites du CC et des taux de fuite, tout comme le niveau de réservoir de stockage de D₂O.

Les petites fuites chroniques peuvent avoir plusieurs conséquences graves. Ce sont :

1. Rejet de matières radioactives (principalement du tritium) dans la centrale et possiblement dans l'environnement.

2. Des pertes possibles de contrôle de la pression du CC accompagnées de problèmes de refroidissement du combustible consécutifs.
3. Fardeau économique : coûts de remise à neuf et d'augmentation de la teneur isotopique plus élevés.

Autres indications de fuite

D'autres points de fuite potentielle peuvent nécessiter des indications additionnelles autres que celles associées aux taux de récupération du D₂O. Mentionnons notamment les fuites des tubes de force et des tubes des générateurs de vapeur.

Fuite d'un tube de force

Une indication précoce d'une fuite d'un tube de force peut être obtenue par la surveillance continue du point de rosée du gaz annulaire. Cette lecture indique seulement qu'un tube de force a une fuite – l'identification du tube de force en particulier nécessitera l'utilisation d'autres méthodes d'identification. Ainsi, un tube de force qui fuit peut dénoter un APRP, et ses effets néfastes.

Fuite d'un tube de générateur de vapeur

Une fuite d'un tube de générateur de vapeur entraînera la présence d'anneaux à haute pression dans le circuit secondaire. Les conséquences varient selon l'ampleur de la fuite. Par exemple, plusieurs tubes de générateur de vapeur (brisés) qui fuient peuvent causer une baisse de la pression dans le CC et le niveau du générateur de vapeur en cause peut augmenter en raison du transfert d'inventaire provenant du CC vers le générateur de vapeur (c'est ce qui se produit lors d'un APRP). Par ailleurs, une petite fuite d'un tube de générateur de vapeur ne causera pas de problèmes de contrôle aussi importants.

Une conséquence courante des différentes fuites de tube de générateur de vapeur est le rejet de matières radioactives, principalement du tritium, dans le circuit de vapeur. Cela peut avoir les conséquences suivantes :

- a. Formation d'une brèche dans le confinement. La radioactivité peut être rejetée dans l'environnement par des trajets non surveillés, par exemple purge du générateur de vapeur et extraction d'air du condenseur, vannes de décharge de vapeur atmosphérique (VDVA), ou vannes de rejet de vapeur (VRV).

- b. Le D₂O est irrécupérable, ce qui cause une pénalité sur le plan économique.

3.4.8 Notions principales

Un taux de collecte de fuite anormalement élevé peut donner lieu à :

- Un rejet de matières radioactives;
- Une perte potentielle de contrôle de la pression du CC et du refroidissement du combustible;
- Une pénalité économique.

Une fuite d'un tube de force doit être corrigée étant donné qu'elle pourrait causer un APRP à cause d'une défaillance d'un tube de force.

Les fuites des générateurs de vapeur peuvent donner lieu à :

- des rejets de matières radioactives non surveillées;
- des fuites de D₂O non récupérable.

3.5 AUXILIAIRES DU CIRCUIT CALOPORTEUR

Cette section porte sur un certain nombre de systèmes auxiliaires essentiels pour assurer le fonctionnement fiable et prolongé du circuit caloporteur (CC).

Les systèmes décrits sont :

1. Épuration du CC
2. Addition d'hydrogène dans le CC
3. Circuit d'alimentation du joint d'étanchéité de la pompe principale du CC

3.5.1 Circuit d'épuration du circuit caloporteur

Les cours précédents de R&A ont déjà décrits l'équipement (filtres, crépines et colonnes échangeuses d'ions) requis pour épurer le caloporteur du CC.

De façon générale, le processus d'épuration joue deux rôles :

- a) Maintenir les paramètres chimiques du CC à des niveaux spécifiés;

b) Éliminer les impuretés (dépôts) du CC.

La méthode permettant d'assurer l'écoulement dans le circuit caloporteur est propre au site. Dans la plupart des centrales, l'épuration se produit à une pression réduite (entre 300 et 1 000 kPa). Dans d'autres centrales, l'épuration se produit à la pression maximale du CC (entre 9 et 10 MPa). Cependant, certains paramètres courants existent. Un circuit d'épuration de type courant est illustré à la figure 3.19.

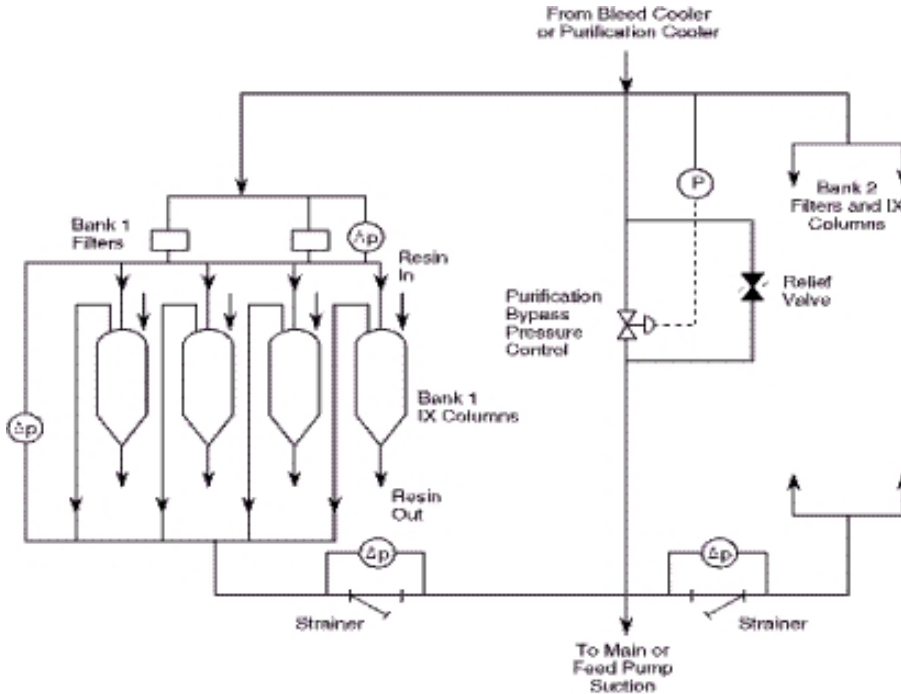


Figure 3.19
Circuit d'épuration du CC de type courant

From Bleed Cooler or Purification Cooler	En provenance du refroidisseur de purge ou du refroidisseur d'épuration
Bank 1 Filters	Filtres du groupe 1
Resin in	Entrée de résine
Purification Bypass Pressure Control	Contrôle de la pression et contournement de l'épuration
Bank 2 Filters and IX Columns	Filtres et colonnes échangeuses d'ions du groupe 2
Relief Valve	Vanne de décharge
Bank 1 IX Columns	Colonnes échangeuses d'ions du groupe 1
Resin Out	Sortie de résine
Strainer	Crépine
To Main or Feed Pump Suction	Vers l'aspiration de pompe principale ou de pompe d'alimentation

Strainer	Crépine
----------	---------

Pour assurer le fonctionnement adéquat de ce circuit, les paramètres suivants doivent être maintenus à l'intérieur des limites précisées :

- a) Température d'admission
- b) Écoulement
- c) ΔP de part et d'autre du circuit
- d) Pression d'admission

Chacun de ces paramètres est décrit de manière détaillée ci-après.

Température d'admission

La température du caloporteur (D_2O) qui alimente les colonnes échangeuses d'ions est limitée à environ 65 °C afin de protéger les résines échangeuses d'ions contre les dommages. Une température élevée dans le D_2O d'alimentation vers les colonnes échangeuses d'ions pourrait avoir les conséquences suivantes :

- a) Réduction de l'efficacité de l'échange d'ions (particulièrement les anions);
- b) Risque de fusion des résines échangeuses d'ions et migration consécutive vers le CC;
- c) Rejet de produits chimiques résiduels (p. ex. chlorures, fluorures) qui peuvent se trouver dans la résine. Cela augmente le risque de problèmes de corrosion sous contrainte des composants en zircaloy ou en acier inoxydable.

Pour éviter ces conséquences, l'écoulement d'épuration du CC doit être refroidi par rapport à la température de fonctionnement du réacteur (~250 °C) lorsque le réacteur est en régime de puissance. Dans la plupart des centrales, une combinaison du condenseur de purge et du refroidisseur de purge permettent d'obtenir la réduction de température (et de pression) nécessaire. Dans d'autres centrales, lorsque l'épuration se produit à la pression maximale du CC, deux échangeurs ainsi qu'un refroidisseur permettent le refroidissement. Dans les deux cas, le D_2O est partiellement refroidi par le D_2O qui retourne au CC, et partiellement refroidi par l'eau de refroidissement. La figure 3.20 illustre le circuit d'épuration pour les

systèmes qui fonctionnent à pression réduite. La figure 3.21 illustre le circuit d'épuration pour les systèmes qui fonctionnent à la pression maximale du CC.

Écoulement

Dans les centrales où l'épuration est réalisée à pression réduite, l'écoulement est ajusté en variant l'écart sur les vannes de purge. Un écoulement maximal de type courant est d'environ 40 kg/s, avec une page de 8 à 10 kg/s constituant le débit habituel. En supposant que la performance des colonnes échangeuses d'ions est normale, cela donnera lieu à une période de nettoyage d'environ trois à quatre heures. C'est le temps requis pour réduire le niveau des impuretés à la moitié de sa valeur originale, en supposant qu'il n'y a pas d'addition d'autres impuretés.

Des débits accrus peuvent être choisis, par exemple pour réduire les niveaux de I^{131} dans le CC ou pour réduire les effets des rejets de dépôt. Les résines peuvent être endommagées lorsque le débit est excessif.

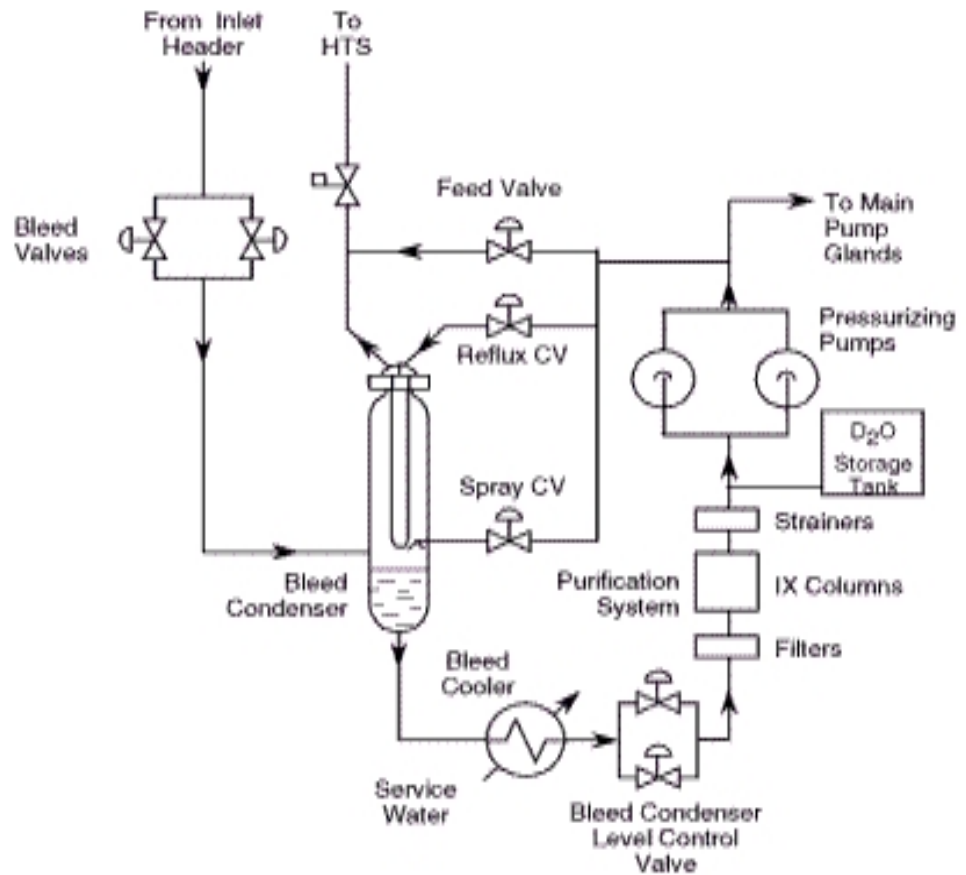


Figure 3.20
Circuit d'épuration exigeant une réduction de la pression

From Inlet Header	En provenance du collecteur d'entrée
To HTS	Vers le CC
Bleed Valves	Vannes de purge
Feed Valve	Vanne d'alimentation
To Main Pump Glands	Vers les garnitures de pompe principale
Reflux CV	Vanne à reflux
Pressurizing Pumps	Pompes de pressurisation
Spray CV	VC d'aspersion
Bleed Condenser	Condenseur de purge
D ₂ O Storage Tank	Réservoir de stockage du D ₂ O
Strainers	Crépines
Purification System	Circuit d'épuration
IX Columns	Colonnes échangeuses d'ions
Bleed Cooler	Refroidisseur de purge
Filters	Filtres
Service Water	Eau de service
Bleed Condenser Level Control Valve	Vanne de contrôle du niveau du condenseur de purge

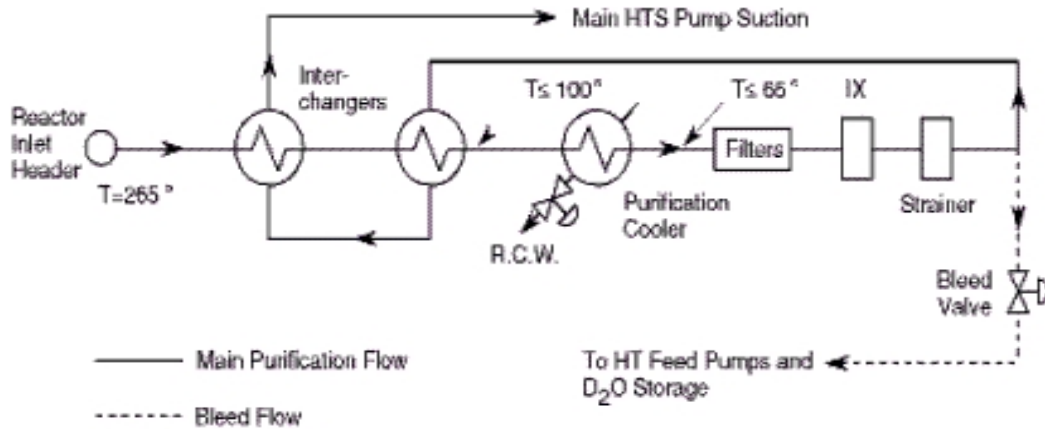


Figure 3.21

Circuit d'épuration utilisant une pression maximale du circuit

Reactor Inlet Header	Collecteur d'entrée du réacteur
Inter-changers	Échangeurs
Main HTS Pump Suction	Aspiration de la pompe principale du CC
R.C.W.	ERR
Purification Cooler	Refroidisseur d'épuration
Filters	Filtres
Strainer	Crépine
Main Purification Flow	Écoulement d'épuration principale
To HT Feed Pumps and D ₂ O Storage	Vers les pompes d'alimentation du CC et le stockage du D ₂ O
Bleed Valve	Vanne de purge
Bleed Flow	Écoulement de purge
IX	Colonne échangeuse d'ions

Si les dépôts en circulation ne sont pas retirés du CC, une activation subséquente des neutrons et une redéposition des matières pourraient créer des problèmes radiologiques dans le CC (homme-rem accrue). Le débit d'épuration plus important éliminera une bonne partie ou la totalité de ces produits. Cependant, l'enlèvement de ces matériaux dans le circuit d'épuration pourrait causer des champs de rayonnement élevé autour des filtres, des crépines et des colonnes échangeuses d'ions.

Cependant, les écoulements d'épuration qui sont trop élevés réduiront l'efficacité des colonnes échangeuses d'ions (le caloporteur ne passe pas suffisamment de temps dans les colonnes échangeuses d'ions pour que le procédé soit efficace).

Dans le cas des centrales où l'épuration se fait à la pleine puissance du CC, le débit du circuit d'épuration est indépendant de la position de la vanne de purge. L'épuration se fait par un écoulement de

contournement autour des pompes de circulation principales du CC (se reporter à la figure 3.21). L'opérateur contrôle manuellement le débit dans le circuit d'épuration à l'aide d'une vanne de contrôle de l'écoulement. L'écoulement est contrôlé avec une limite supérieure de ~ 25 kg/s, ce qui équivaut à une période d'épuration d'environ 60 minutes.

À noter que dans les centrales où le circuit d'épuration fonctionne à la puissance maximale du CC, le circuit caloporteur et les pompes de circulation fixent la baisse de pression d'épuration. Les écoulements maximums sont déterminés par la taille des conduites et les plaques des orifices et sont contrôlés par des transmetteurs ΔP .

Le contrôle de l'écoulement d'épuration peut être compromis lorsque la température est élevée, et cela peut endommager les résines.

3.5.2 ΔP d'épuration

Les filtres, les colonnes échangeuses d'ions et les crépines sont dotés d'indicateur de la pression différentielle (telle qu'indiquée à la figure 3.19). Toute augmentation de ΔP de part et d'autre d'un composant indiquera une réduction de l'écoulement d'épuration. Cela pourrait compromettre l'efficacité du circuit d'épuration. Pour cette raison, il est important que toute augmentation de ΔP au-delà des spécifications soit corrigée.

Dans le cas des filtres, ΔP indique le degré d'accumulation des dépôts et la nécessité de remplacer les filtres.

Une ΔP élevée de part et d'autre des colonnes échanges d'ions indique une accumulation d'impuretés solides dans la colonne ou une compaction des fines de résine, ce qui nécessitera le remplacement des résines.

Les crépines en aval des colonnes échangeuses d'ions recueillent toute résine qui s'échappe dans le circuit. Une ΔP élevée de part et d'autre d'une crépine indique qu'elle doit être nettoyée.

Pression d'admission

L'écoulement nominal dans le circuit de l'épuration est obtenu en réglant la pression d'admission à une valeur prédéterminée afin de tenir compte de toutes les baisses de pression prévues dans le circuit. Lorsque la pression d'admission est trop élevée, il pourrait y avoir un écoulement d'épuration plus important dans les colonnes échangeuses d'ions, ce qui risque de les rendre moins efficaces. En outre, la

surpression dans les composantes pourrait en découler (dans le cas des circuits qui fonctionnent à des pressions réduites). Cette situation peut être corrigée de deux manières :

- a) En contournant le circuit d'épuration et en dirigeant l'écoulement directement vers le stockage du D₂O;
- b) En ayant recours aux vannes de décharge sur chaque composant. Cela permettra de ménager la fonction de stockage du D₂O.

Lorsque la pression d'admission est trop faible, l'écoulement d'épuration sera réduit. Encore une fois, il y a un risque que la quantité de D₂O dans le CC qui sera nettoyée soit insuffisante.

3.5.3 Conditions de fonctionnement anormales

Nous avons déjà mentionné que certaines situations exigent un écoulement d'épuration plus important, c.-à-d. qu'il faut réduire davantage la présence d'iode radioactif et de dépôt. Ces situations seront maintenant expliquées.

Enlèvement de l'iode radioactif

Le permis d'exploitation de la centrale fixe des limites relatives à la quantité d'iode radioactif pouvant être présente dans le CC lorsque le réacteur est en régime de puissance. La raison de cette limite est de protéger le public et les employés de centrale contre le dépassement des limites de dose, en cas de rejet hors du CC. La présence d'iode radioactif dans le CC indique qu'il y a une défaillance du combustible dans le réacteur. L'écoulement d'épuration est plus important pour enlever l'iode radioactif. Si les niveaux d'iode radioactif dépassent ceux précisés dans le permis, le réacteur doit être mis à l'arrêt. Même à l'état d'arrêt, l'écoulement d'épuration sera maintenu à un niveau élevé afin de faciliter le processus d'enlèvement. À noter que le rejet d'iode radioactif en provenance du combustible défectueux peut se poursuivre même après la mise à l'arrêt, selon la gravité de la défaillance du combustible.

Enlèvement des impuretés

L'enlèvement des impuretés peut se produire pendant certaines conditions d'exploitation du réacteur résultant des transitoires thermiques ou chimiques, comme le réchauffement et le refroidissement, les manœuvres de puissance du réacteur ou pendant les conditions d'exploitation normales lorsque les paramètres chimiques s'éloignent des spécifications.

Dans de tels cas, l'enlèvement primaire se fera par des filtres et par une épuration accrue. L'épuration plus importante sera généralement effectuée grâce à (ou par une combinaison de) :

- i) Écoulement d'épuration accrue (capacité limitée);
- ii) Davantage d'équipement d'épuration en service. Cela augmentera le temps passé dans les colonnes échangeuses d'ions par le caloporteur (c.-à-d. que pour un écoulement donné, l'écoulement sera plus lent et qu'il empruntera un nombre plus élevé de trajets d'écoulement).

3.5.4 *Notions principales*

- Le circuit d'épuration du CC est conçu pour maintenir les paramètres chimiques du CC à l'intérieur des spécifications et pour éliminer les impuretés du CC.
- La température du CC d'épuration est maintenue à ≤ 65 °C pour :
 - S'assurer que les colonnes échangeuses d'ions ne rejettent pas de produits chimiques pouvant entraîner une corrosion sous contrainte des composantes du réacteur;
 - Éviter que la fusion des microbilles et leur migration se produisent dans le CC;
 - Éviter une réduction de l'efficacité des résines échangeuses d'ions.
- Le refroidissement adéquat de l'écoulement de purge contrôle la température d'épuration. Dans le circuit d'épuration de type courant, la réduction de pression et de température se produit dans le condenseur de purge et dans le refroidisseur de purge. Dans les centrales où le circuit d'épuration fonctionne à la pression maximale du CC, deux échangeurs ainsi qu'un refroidisseur d'épuration assurent le refroidissement.
- L'écoulement d'épuration doit être maintenu à un taux suffisant pour s'assurer que les dépôts et que les produits de fission (I^{131}) sont éliminés. Sans épuration, ces impuretés pourraient devenir radioactives et se redéposer dans le CC.

- L'écoulement d'épuration peut être contrôlé par la purge. Dans les centrales où le circuit d'épuration fonctionne à la puissance maximale du CC, l'écoulement est contrôlé manuellement.
- Une ΔP élevée de part et d'autre des composants d'épuration indique que :
 - Les filtres sont bouchés et doivent être remplacés;
 - Les crépines sont bouchées et doivent être nettoyées;
 - Les résines sont compactées ou contaminées par des impuretés et devront peut-être être remplacées.
- La pression à l'admission est réglée de manière à prévoir toutes les pertes dans le circuit d'épuration. Une pression d'admission trop élevée pourrait donner lieu à un écoulement d'épuration excessif et à une diminution correspondante de l'efficacité des résines. Lorsque la pression d'admission est trop faible, cela pourrait entraîner un écoulement d'épuration insuffisant pour nettoyer le CC.
- Une vanne de contrôle permet de contrôler la pression d'admission de l'épuration en la maintenant inférieure à la valeur maximale par un contournement de l'écoulement d'épuration lorsque la valeur seuil d'élévation est dépassée. En outre, des vannes de rejet de vapeur permettent à chaque composant d'être protégé contre la surpression.
- Le réchauffement/refroidissement du CC, les manœuvres de puissance du réacteur ou le fonctionnement normal avec des excursions chimiques peuvent entraîner la présence de dépôts. Les dépôts sont éliminés en augmentant l'écoulement d'épuration ou en mettant en service davantage d'équipement d'épuration.

3.5.5 Système d'addition d'hydrogène dans le circuit caloporteur

La radiolyse du caloporteur du CC lorsqu'il se trouve dans le cœur du réacteur donne lieu à la formation de D_2 et de O_2 gazeux. Ces gaz demeurent en solution lorsque les températures et les pressions de fonctionnement du CC sont normales. Néanmoins, le D_2 et le O_2 peuvent être dégagés dans certaines conditions d'exploitation et causer des mélanges explosifs.

Heureusement, la réaction de radiolyse est réversible. On peut procéder à la recombinaison en ajoutant du H_2 ou du D_2 gazeux, car le D_2 et le H_2 se comportent de manière identique dans la réaction. L'un ou l'autre peuvent être utilisés pour piéger l'oxygène; la seule différence est que le produit final diffère : D_2O ou H_2O .

Le choix du gaz s'explique par des raisons économiques : l'hydrogène coûte beaucoup moins cher que le deutérium. Cependant, il en coûtera plus cher pour faire baisser la teneur isotopique du D_2O étant donné que l'addition de H_2 forme du H_2O . À l'heure actuelle, on utilise exclusivement de l'hydrogène.

On ajoute de l'hydrogène au CC pour maintenir la concentration de deutérium/d'hydrogène, et par conséquent la concentration d'oxygène, à l'intérieur des limites spécifiées pour la centrale.

La concentration d'hydrogène est surveillée (contrairement à l'oxygène) parce qu'il est facile de mesurer le H_2 . Cela permet de s'assurer que la quantité optimale de H_2 est injectée dans le circuit.

Une addition inadéquate d'hydrogène peut avoir les conséquences fâcheuses suivantes :

- a) Addition insuffisante d'hydrogène entraînant la présence de O_2 en excès. Le O_2 en excès favorise la corrosion des composants et la formation d'impureté radioactive (produit de corrosion);
- b) L'addition excessive d'hydrogène n'est pas souhaitable non plus parce qu'elle favorise la fragilisation des tubes de force. À noter également que la corrosion pourrait entraîner la présence de D_2 (H_2) en excès.

Il y a un risque que le H_2 sorte de solution lorsque la pression du CC est réduite (dégazage).

Dans les conditions d'exploitation normales, le dégazage se confine généralement à deux zones :

- Réservoir de stockage du D_2O ;
- Condenseur de purge (ou condenseur du dégazeur, selon la centrale).

Les deux possèdent du D₂O liquide en équilibre thermique avec la valeur de D₂O au-dessus.

Dans le réservoir de stockage du D₂O, le gaz de couverture est de l'hélium. Cependant, le H₂/D₂ gazeux sera également présent en raison du dégazage des gaz de radiolyse. Une concentration de plus de 4 % de H₂/D₂ gazeux rendra nécessaire la purge afin de réduire la possibilité d'une explosion de H₂/D₂.

La vapeur saturée dans le gaz de couverture du condenseur de purge contient du O₂, D₂/H₂ et des produits de fission gazeux (comme le Xe et le Kr). Ces gaz sortent de solution du D₂O du CC lorsqu'il passe à l'état vapeur au moment d'entrer dans le condenseur de purge. Étant donné que ces gaz ne sont pas compressibles à la température du condenseur de purge, ils peuvent s'accumuler graduellement dans l'atmosphère du condenseur de purge. Ils se concentrent principalement à proximité des serpentins de refroidissement à reflux parce que c'est à cet endroit que la vapeur se condense et laisse les gaz derrière (processus appelé couche de vapeur dans les tubes). La collecte des gaz empêche le refroidissement à reflux dans le condenseur de purge.

La pression de vapeur partielle autour des serpentins est inférieure à la pression partielle de vapeur dans le reste du condenseur de purge. Par conséquent, le liquide condensé qui s'est formé dans les serpentins de refroidissement est plus froid que la vapeur à l'entrée de D₂O dans le condenseur de purge (où la concentration des gaz est plus faible). Ainsi, le ΔT entre la vapeur au-dessus du condenseur et le liquide en bas dénote qu'il y a accumulation de gaz. Si la ΔT devient excessive, le système de gestion des effluents gazeux procédera à un dégazage. Le dégazage permettra d'éliminer les produits de fission gazeux ainsi que le D₂ et le O₂, produits par radiolyse.

Dans les réacteurs qui ne possèdent pas de condenseur de purge, le dégazage se fait dans le condenseur du dégazeur. L'écoulement de dégazage est généré par le condenseur du dégazeur du CC ou par l'écoulement de purge de la vapeur du pressuriseur. Le mélange vapeur/gaz est dirigé vers un condenseur d'évitage, puis vers la récupération de vapeur. Ainsi, le problème de la réduction de la capacité de refroidissement à reflux est éliminé.

Dans un système qui utilise un condenseur du dégazeur, le refroidissement se fait par aspersion seulement. Il n'y a pas de tubes à reflux dans le condenseur.

Mise à l'arrêt du réacteur

La radiolyse dans des conditions d'arrêt est réduite au minimum. Par conséquent, l'addition d'hydrogène est discontinuée. Cela réduit également le risque d'accumulation de H₂ dans le CC, particulièrement durant l'entretien, où le H₂ pourrait causer un danger d'explosion. Pour réduire ce risque davantage, l'addition de H₂ peut être arrêtée une journée avant l'arrêt prévu.

Alimentation en hydrogène

L'alimentation d'hydrogène par injection se fait à l'aide de bouteilles d'hydrogène standard. Dans la plupart des centrales, l'addition d'hydrogène est faite à l'aspiration de la pompe d'alimentation du CC. Les bouteilles sont déclarées épuisées lorsque la pression diminue à la pression d'aspiration des pompes d'alimentation. Étant donné que les pompes comportent un dispositif de blocage de gaz, l'alimentation d'hydrogène doit être isolée lorsque les pompes sont arrêtées.

À noter également que des dangers classiques existent en raison de la manipulation de bouteilles de gaz comprimé et du fait que le H₂ peut constituer un mélange explosif dans l'air.

3.5.6 Notions principales

- L'addition d'hydrogène dans le CC par le système d'addition d'hydrogène vient contrer la réaction de radiolyse et recombine le O₂ (pour former du H₂O), ce qui réduit le risque de corrosion du CC. Ce système n'est pas requis durant les mises à l'arrêt, car la radiolyse y est beaucoup moins importante.
- Des quantités accrues de gaz non compressible (principalement du O₂, du D₂ ou du H₂ et des gaz rares) dans le condenseur de purge peuvent réduire l'efficacité du refroidissement à reflux. Les concentrations plus élevées de O₂ avec le D₂ ou le H₂ dans le réservoir de stockage du D₂O peuvent causer un danger d'explosion.
- L'addition d'hydrogène en excès dans le CC augmente le risque de fragilisation des tubes de force par l'hydrogène.

3.5.7 Circuit d'alimentation du joint d'étanchéité du circuit caloporteur

Les pompes principales du CC font circuler de manière continue du D₂O chaud (265 °C), pressurisé (~8 à 10 MPa), lorsque le réacteur est en régime de puissance. Ce D₂O contient des matières radioactives. Il est important que ce D₂O soit contenu à l'intérieur du corps et de la

garniture de la pompe (qui font partie de la limite du CC) en tout temps. Pour assurer ce confinement, l'arbre de la pompe est entouré d'une garniture.

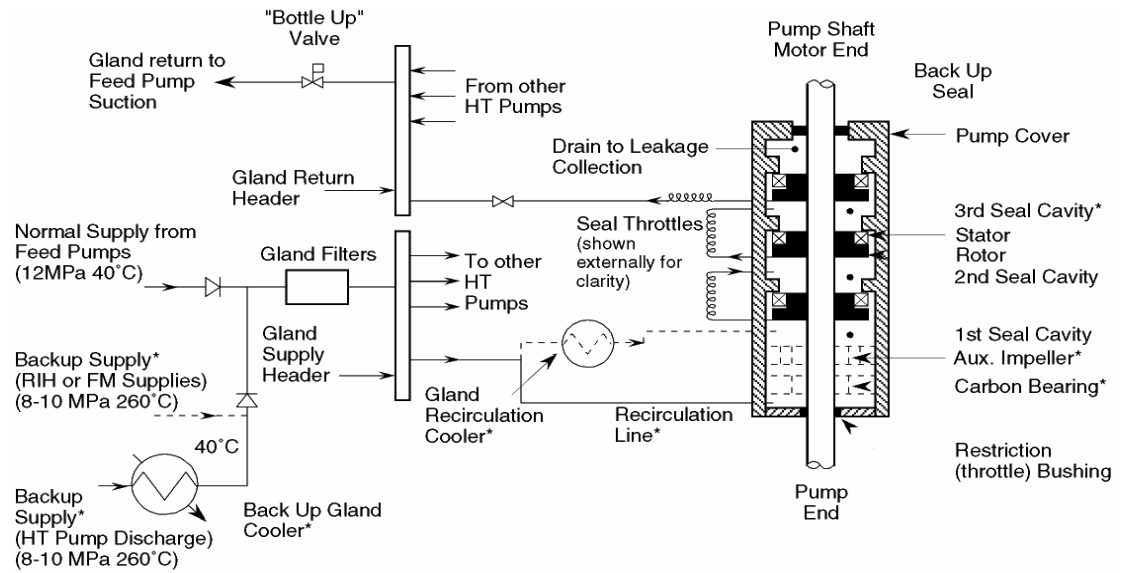
Cette garniture comprend un certain nombre de joints mécaniques (deux ou trois selon les centrales). Ce joint permet une baisse de pression graduelle (de la pression du CC à la pression atmosphérique) par étapes de part et d'autre des joints, ce qui réduit la baisse de pression de part et d'autre des joints (c.-à-d. qu'une partie du fluide traverse chaque joint), un refroidissement et une lubrification de l'alimentation en D₂O pour le joint. Il convient également de noter que chacun des joints primaires ou secondaires peut supporter la pression maximale du CC, mais s'il y a une défaillance, la redondance est perdue.

Pour un fonctionnement efficace, les joints doivent être continuellement alimentés en D₂O froid, pur et à pression élevée. Le circuit d'alimentation du joint d'étanchéité joue ce rôle.

Le circuit d'alimentation joue deux grands rôles :

- a) Assurer un écoulement de D₂O froid (~ 40 °C), et filtré vers la garniture pour refroidir et lubrifier les joints mécaniques;
- b) Fournir du D₂O haute pression (~12 MPa) aux cavités des joints, et éviter ainsi que du D₂O chaud et non filtré pénètre dans la garniture.

Un circuit d'alimentation du joint d'étanchéité représentatif est illustré à la figure 3.22.



* Only in some stations

--- Used only if pump bearing is part of gland

Figure 3.22
Joint d'étanchéité de type courant

"Bottle Up" Valve	Vanne « d'emprisonnement »
Gland return to Feed Pump Suction	Tubulure de retour de la garniture vers l'aspiration de la pompe d'alimentation
From other HT Pumps	En provenance d'autres pompes du CC
Pump Shaft Motor End	Moteur de l'arbre de pompe
Gland Return Header	Collecteur de retour de la garniture
Normal Supply from Feed Pumps (12MPa 40°C)	Approvisionnement normal des pompes d'alimentation (12 MPa à 40 °C)
Backup Supply* (RIH or FM Supplies) (8-10 MPa 260°C)	Approvisionnement de secours* (collecteur d'entrée du réacteur ou MPA, 8 à 10 MPa à 260 °C)
Backup Supply* (HT Pump Discharge) (8-10 MPa 260°C)	Alimentation de secours* (décharge de pompe du CC, 8 à 10 MPa à 260 °C)
Gland Filters	Filtres de garniture
Gland Supply Header	Collecteur d'alimentation de la garniture
Back Up Gland Cooler*	Refroidisseur* de garniture de secours
Drain to Leakage Collection	Drain vers la collecte des fuites
To other HT Pumps	Vers d'autres pompes du CC
Seal Throttles (shown externally for clarity)	Régulateurs de joint (illustrés à des fins de clarté)
Gland Recirculation Cooler*	Refroidisseur* de recirculation de la garniture
Recirculation Line*	Tubulure de recirculation*
Back Up Seal	Joint de secours
Pump Cover	Couvercle de pompe

3rd Seal Cavity* Stator Rotor 2 nd Seal Cavity	3 ^e cavité de joint* Rotor du stator 2 ^e cavité de joint
1st Seal Cavity Aux. Impeller* Carbon Bearing*	Première cavité de joint Roues à aubes auxiliaires* Palier en carbone*
Restriction (throttle) Bushing	Bague de restriction (régulateur)
Pump End	Extrémité de pompe
Only in some stations Used only if pump bearing is part of gland	* Seulement dans certaines centrales Utilisé seulement si le palier de pompe fait partie de la garniture

L'alimentation normale de D₂O dans le circuit d'alimentation du joint d'étanchéité est le réservoir de stockage du D₂O. Ce D₂O est déjà passé dans le circuit d'épuration du CC. Il est alimenté par les pompes d'alimentation du CC, par un système de filtre, vers le collecteur d'alimentation des garnitures.

Ce groupe de filtres, dans des conditions normales, constitue une mesure de précaution. Il réduit la possibilité que des matières particulières pénètrent dans la garniture. À noter que les faces du joint (en carbone et en carbure de tungstène) sont rendues très planes (à quelques millièmes de millimètre) et que même des particules minuscules peuvent causer des dommages, ce qui entraîne des fuites additionnelles aux faces des joints.

Une quantité minimale de D₂O traverse chaque joint pour le lubrifier. Cet écoulement de lubrification réduit la chaleur générique par le frottement. Le débit est habituellement de quelques cm³/minute.

Environ 10 % de l'écoulement de D₂O total dans la garniture s'écoule entre les différentes cavités de joint par les régulateurs de joint disposés en parallèle par rapport aux faces des joints. Cela cause une baisse graduelle de la pression du D₂O dans les cavités de joint. L'écoulement de D₂O froid d'une cavité à l'autre par les régulateurs de joint permet également d'évacuer la chaleur des joints.

Le reste de l'écoulement est manipulé de deux manières, selon la conception du joint. Dans certains joints, tout l'écoulement qui reste (~90 % de l'écoulement total) pénètre dans le CC par les bagues de restriction (régulateur). Cet écoulement est le principal facteur permettant d'éviter que le D₂O chaud provenant du CC entre dans la garniture et permettant également d'ajouter constamment du D₂O à l'inventaire du CC (c.-à-d. que l'ouverture des vannes de purge est requise). Dans d'autres conceptions de joint, seulement ~10 % de l'écoulement entre dans le CC par les bagues de restriction (en suivant

le même objectif que précédemment) et le reste de l'écoulement passe dans le circuit de recirculation dans le joint. À noter que la majeure partie de cet écoulement de recirculation contourne le joint par des ouvertures dans l'enveloppe du joint (qui ne sont pas illustrées à la figure 3.22).

L'écoulement dans la tubulure de retour de la garniture vient de la cavité finale du joint. Toute fuite de part et d'autre du joint final sera contenue par le joint de secours et dirigée par la collecte du D₂O.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le joint d'étanchéité exige une alimentation de D₂O pressurisé froid en tout temps lorsque le CC est sous pression. La perte de cette alimentation risque de causer une surchauffe rapide du joint pour les raisons suivantes :

- a) Perte de D₂O froid à travers les joints;
- b) Entrée de D₂O chaud en provenance du CC par les bagues de restriction.

Cette surchauffe peut endommager les joints dans une très courte période de temps (habituellement quelques minutes si la vanne du joint de la garniture n'est pas fermée). Afin d'éviter cela, une alimentation du joint de garniture de secours existe. Elle provient de la décharge de pompe du CC principal (ou collecteur d'entrée du réacteur) ou des pompes d'alimentation du D₂O de la machine de chargement de combustible (seulement dans certaines centrales). Sa température est habituellement élevée (>250 °C) et il faut assurer un certain refroidissement du D₂O à ~40 °C. Ce refroidissement est assuré soit par le refroidisseur de recirculation ou par le refroidisseur de garniture de secours, selon la conception du joint. Le D₂O possède également un niveau élevé d'impuretés. Les filtres de garniture sont utilisés pour nettoyer le D₂O. C'est le rôle principal des filtres de garniture.

La présence de vannes de contrôle permet d'assurer que l'alimentation de secours devient disponible immédiatement lors de la perte de l'alimentation normale. L'eau de refroidissement vers les refroidisseurs de secours ou les refroidisseurs de recirculation (selon la centrale) est toujours en service. Les vannes de contrôle permettent également d'éviter qu'il y ait interaction entre l'alimentation de secours et l'alimentation normale dans des conditions normales lorsque l'alimentation de secours est à basse pression.

Étant donné que la perte totale d'alimentation du joint peut causer une défaillance des joints dans une très courte période, il est important de

fournir au personnel de la salle de commandes des renseignements sur l'identification des problèmes d'alimentation de garniture. Ceux-ci comprennent notamment :

- a) Écoulement du joint d'étanchéité de pompe
- b) Température de la tubulure de retour de la garniture
- c) Températures entre les joints d'étanchéité (et température de recirculation, s'il y a lieu)
- d) Pressions entre les joints d'étanchéité.

La pression différentielle des filtres de garniture peut également être surveillée, car elle peut dénoter des problèmes d'écoulement en raison du blocage des filtres. Cela permet d'éviter d'endommager les joints.

Il n'y a pas d'arrêts du réacteur ou des pompes du CC qui sont directement initiés par ces paramètres. Une intervention manuelle de l'opérateur est requise pour arrêter la pompe ou pour ajuster les valeurs des paramètres en cas d'alarme nécessitant la prise de mesure.

Tubulure de retour de la garniture

La tubulure de retour de la garniture retourne le D₂O vers l'aspiration de la pompe d'alimentation. La pression de la cavité de joint peut souvent être ajustée par le fonctionnement manuel d'une vanne dans la tubulure de retour.

La vanne d'emprisonnement motorisée peut être fermée automatiquement lorsque l'écoulement d'alimentation est faible dans la garniture. Cela est parfois nécessaire, lorsque par exemple les pompes d'alimentation sont défectueuses et que l'alimentation de secours n'est pas disponible. Cela permet d'éviter que du D₂O du CC trop chaud et impur ne pénètre dans la garniture par les bagues de restriction.

Après l'emprisonnement, le refroidissement de l'eau des joints d'étanchéité est limité au refroidissement assuré par le refroidisseur de recirculation (s'il y a lieu) ou par la chemise de refroidissement qui entoure la garniture (celle-ci n'est pas illustrée sur le diagramme). L'écoulement normal dans la garniture doit être restauré le plus rapidement possible afin d'éviter que le joint ne soit endommagé.

Notions principales

- Le circuit d'alimentation du joint d'étanchéité du CC doit être disponible en tout temps pour maintenir le D₂O potentiellement contaminé du CC dans les pompes principales (donc à l'intérieur de la limite du CC).
- Le circuit d'alimentation du joint d'étanchéité du CC doit fournir du D₂O haute pression, propre et froid aux garnitures de pompes du CC. Cela permet d'assurer le refroidissement et la lubrification des joints mécaniques et d'empêcher les fuites de D₂O du CC chaud et impur hors du corps des pompes principales du CC de se produire et de pénétrer dans la garniture. On doit filtrer pour s'assurer que les faces des joints ne sont pas endommagées par des corps étrangers.
- L'alimentation de secours du joint d'étanchéité est assurée par la décharge des pompes de circulation du CC (ou les collecteurs d'entrée du réacteur) ou par les pompes d'alimentation en D₂O de la machine de chargement de combustible. Cette eau est chaude et impure, et par conséquent on doit la refroidir et la filtrer avant d'alimenter la garniture.
- L'écoulement autour des joints, la température de retour, la température entre les joints (et également la température de recirculation) ainsi que la pression entre les joints peuvent être surveillés afin de déterminer l'état des joints.
- La vanne d'emprisonnement se ferme automatiquement en cas de perte d'écoulement autour des joints. Cela permet d'éviter que du D₂O du CC chaud et impur ne s'écoule dans les joints.

3.6 EXERCICES

3.6.1 Transfert de chaleur

1. Pour chacun des états de fonctionnement préciser, dessiner et nommer les composantes qui illustrent le rôle du CC dans le transfert de chaleur.
 - a) À pleine puissance, avec la puissance de sortie électrique vers le réseau nominal (deux grands trajets);
 - b) Pendant l'évitement de l'empoisonnement (trajet principal seulement), pour une centrale qui utilise des VDVC et pour une centrale qui utilise des VRV.

On doit indiquer :

- i La source de chaleur principale
 - ii Les vecteurs thermiques
 - iii Les pompes requises
 - iv Les points de transfert d'énergie thermique
 - v Les sources froides.
2. Expliquer les deux contraintes de fonctionnement du circuit CC pour l'évitement de la fissuration par hydruration retardée.
3. Nommer les trois grandes catégories de danger potentiel associé au CC.
4. De l'hydrogène gazeux est ajouté au circuit caloporteur. Nommer les deux dangers que cela comporte.

3.6.2 Contrôle de la pression et de l'inventaire

5. Pendant le fonctionnement, la pression dans le CC est maintenue entre une limite supérieure et une limite inférieure. Préciser les conséquences possibles du fonctionnement à l'extérieur de ces limites.
6. Donner deux raisons pour lesquelles le blocage de l'écoulement du caloporteur soulève des préoccupations importantes.
7. Nommer trois effets de l'ébullition dans un canal de combustible.
8. Expliquer pourquoi une certaine ébullition est permise dans certains réacteurs CANDU.

9. Expliquer pourquoi il est nécessaire de contrôler la pression et l'inventaire.
10. Nommer cinq rôles du circuit d'alimentation et de purge dans un réacteur doté d'un pressuriseur lorsqu'il est en mode solide.
11. Nommer cinq rôles du circuit d'alimentation et de purge dans un réacteur doté d'un pressuriseur lorsqu'il est en mode normal.
12. Préciser le rôle du pressuriseur dans le fonctionnement en mode normal.
13. Expliquer brièvement les changements qui surviennent dans le circuit de contrôle de la pression et de l'inventaire en mode normal lorsque la pression dans le circuit est :
 - a. Plus élevée que la valeur seuil.
 - b. Plus basse que la valeur seuil.
14. Nommer six rôles du circuit d'alimentation et de purge dans un réacteur qui ne possède pas de pressuriseur.
15. Nommer et expliquer trois raisons pour lesquelles le niveau du pressuriseur est contrôlé.
16. Expliquer comment le circuit répond au retrait et au gonflement du caloporteur, dans un réacteur doté d'un pressuriseur, pendant les changements de température de l'état froid à la puissance zéro chaude.
17. Expliquer deux façons de réduire les exigences relatives à l'alimentation et à la purge dans les centrales qui ne possèdent pas de pressuriseur.
18. Nommer deux rôles du système de transfert de D_2O .
19. Expliquer trois rôles du réservoir de stockage du D_2O .
20. Donner deux raisons pour lesquelles une limite inférieure est imposée au niveau du réservoir de stockage de D_2O .
21. Donner deux raisons pour lesquelles une limite supérieure est imposée au niveau du réservoir de stockage de D_2O .

22. Expliquer pourquoi la pression est contrôlée dans un condenseur de purge.
23. Expliquer comment la pression est contrôlée dans le condenseur du dégazeur.
24. Dans les circuits caloporteurs avec ou sans pressuriseurs, indiquer, dans le tableau suivant, quelle est la réponse des niveaux du pressuriseur, les écoulements d'alimentation et de purge, la pression et la température du CC, la réponse d'alimentation et de purge et la pression du générateur de vapeur en cas d'augmentation de la puissance du réacteur.

	Réacteurs avec pressuriseur	Réacteur sans pressuriseur
Pression dans le CC		
Température moyenne dans le CC		
Pression du générateur de vapeur		
Alimentation et purge		
Niveau du pressuriseur		

25. Donner la raison pour laquelle il y a une décharge de surpression dans le CC.
26. Donner les deux grandes causes de surpressurisation du CC.

27. Définir les expressions réduction directe et réduction indirecte de la pression.
28. Expliquer deux méthodes de réduction directe de la pression.
29. Expliquer deux méthodes de réduction indirecte de la pression.
30. Expliquer comment la taille des vannes de rejet liquide du CC est déterminée.
31. Décrire les principaux effets des problèmes de procédé suivants :
 - a. vanne de décharge restée ouverte (vanne de rejet liquide)
 - b. défaillance d'une pompe d'alimentation
 - c. vanne de purge de vapeur restée ouverte
 - d. défaillance d'une pompe principale du CC.

3.6.3 Refroidissement à l'arrêt

32. Expliquer la différence entre le refroidissement directe à l'arrêt et le refroidissement indirect à l'arrêt.
33. Expliquer le fonctionnement du circuit de refroidissement direct à l'arrêt.
34. Expliquer le fonctionnement du circuit de refroidissement indirect à l'arrêt.
35. Expliquer le fonctionnement d'un circuit de refroidissement à l'arrêt possédant à la fois un circuit de refroidissement à l'arrêt et un circuit de refroidissement pour l'entretien.
36. Expliquer le phénomène du thermosiphon.
37. Nommer quatre conditions requises pour maintenir le thermosiphon.
38. Définir les expressions suivantes :
 - a. Refroidissement rapide
 - b. Refroidissement d'urgence

39. Décrire les contraintes possibles du recours au circuit de refroidissement à l'arrêt pour l'ensemble des températures du circuit caloporteur.

3.6.4 Eau lourde

40. Donner deux raisons pour lesquelles il y a une limite minimale de la teneur isotopique dans le CC.
41. Donner une raison pour laquelle il y a une limite maximale dans le CC.
42. Énumérez quatre causes importantes de baisse de la teneur isotopique dans le CC.
43. Dans le tableau suivant, indiquer quel est l'effet de la baisse de la teneur isotopique dans le circuit caloporteur :

	Effets à court terme	Effets à long terme
Baisse de la teneur isotopique dans le CC dans le respect des <i>Lignes de conduite pour l'exploitation</i>		
Baisse de la teneur isotopique dans le CC inférieure aux limites précisées dans les <i>Lignes de conduite pour l'exploitation</i>		

44. Énumérer quatre grands dangers radiologiques dans le CC lorsque le réacteur est à l'arrêt.
45. Énumérer deux autres dangers radiologiques lorsque le réacteur fonctionne à des niveaux de puissance élevés.

46. Expliquer le rôle de chacun des circuits de collecte suivants :
- Circuit de collecte du D₂O du CC
 - Circuit de collecte du D₂O en plusieurs points
 - Circuit de récupération de vapeur (4)
 - Circuit de récupération de liquide
- Expliquer pourquoi l'eau du circuit de collecte en plusieurs points est séparée du circuit de collecte du CC.
 - Nommez trois conséquences néfastes d'un taux de collecte de D₂O élevé.
 - Expliquer le danger associé à une fuite d'un tube de force.
 - Nommer trois conséquences d'une fuite d'un tube de générateur de vapeur.
 - Expliquer pourquoi l'eau retournée au circuit de collecte doit être exempte de contaminants.

3.6.5 Auxiliaires du circuit caloporteur

- Donner trois raisons pour lesquelles la température de l'écoulement d'épuration doit être contrôlée.
- Décrire comment le refroidissement de l'écoulement d'épuration se fait dans les centrales où les circuits d'épuration fonctionnent à pression réduite.
- Décrire comment le refroidissement de l'écoulement d'épuration se fait dans les centrales dont les circuits d'épuration fonctionnent à pression maximale.
- Décrire les problèmes qui se présentent lorsque le débit d'épuration est trop élevé ou trop faible.
- Expliquer pourquoi la ΔP de part et d'autre du circuit d'épuration est surveillée.
- Donner trois raisons pour lesquelles on doit s'assurer que la pression à l'entrée du circuit d'épuration est adéquate.
- Donner deux façons de corriger une pression élevée.

14. Donner deux conditions du CC qui pourraient nécessiter une augmentation du taux d'enlèvement des impuretés.
15. Donner deux méthodes visant à augmenter le taux d'enlèvement des impuretés.
16. Préciser le rôle du système d'addition d'hydrogène.
17. Expliquer les conséquences du dépassement de la limite inférieure ou supérieure de la concentration de H_2 dans le CC.
18. Expliquer les conséquences de la sortie de solution du H_2 , du D_2 ou du O_2 dans le condenseur de purge.
19. Expliquer les conséquences de la sortie de solution du H_2 , du D_2 et du O_2 dans le réservoir de stockage du D_2O .
20. Nommer les deux grands rôles du circuit d'alimentation du joint d'étanchéité.
21. Expliquer pourquoi l'alimentation du joint d'étanchéité doit être refroidie, filtrée et pressurisée.
22. Nommer la source de l'alimentation de secours du circuit d'alimentation du joint d'étanchéité.
23. Nommer quatre paramètres qui sont surveillés afin de vérifier l'état du joint d'étanchéité.

4 Systèmes de sûreté spéciaux

4.1 Systèmes d'arrêt d'urgence

Le rôle des systèmes d'arrêt d'urgence (SAU) est de mettre rapidement à l'arrêt le réacteur par une insertion rapide de grandes quantités de réactivité négative dans le cœur. Cela est parfois nécessaire lors des défaillances des systèmes de procédé importants qui ne peuvent pas être compensés de manière sûre par le SRR (système de régulation du réacteur), par les fonctions de recul rapide ou de baisse contrôlée de puissance, ou par d'autres systèmes liés à la sûreté.

4.1.1 Efficacité des systèmes d'arrêt d'urgence

Les systèmes d'arrêt d'urgence doivent être en mesure de réagir aux pires conditions de défaillance du réacteur ou à une combinaison de défaillance et mettre à l'arrêt de manière sûre le réacteur à un niveau qui maintiendra la capacité de refroidissement du combustible. Par exemple, un APRP grave entraînera une augmentation importante de la réactivité en raison du vidage des canaux de combustible. Cela produit une augmentation importante de la puissance du réacteur.

Cela réduit également l'efficacité des sources froides en réduisant la pression du circuit (CC). Un accident dû à la perte de régulation (APR) peut causer une augmentation rapide de la réactivité et, par conséquent, un accroissement rapide de la puissance du réacteur. Les systèmes d'arrêt d'urgence doivent être en mesure de répondre rapidement et avec suffisamment de réactivité négative pour éviter la défaillance de la limite du circuit caloporteur suite à une défaillance de système de procédé.

Les valeurs seuils de déclenchement choisies reflètent les paramètres ayant pour but d'éviter la fusion du combustible et la défaillance consécutive. Étant donné que nous ne possédons pas l'expérience opérationnelle de fusion de l'axe du combustible, nous ne pouvons pas affirmer avec assurance qu'il n'y aura pas de défaillance du tube de force en cas de fusion de l'axe du combustible. Ainsi, la fusion de l'axe du combustible détermine le choix des valeurs seuils du déclenchement. La seule manière d'être raisonnablement sûr que la fusion de l'axe du combustible ne se produira pas consiste à éviter l'assèchement.

Examinons un autre problème. Si la production de chaleur est supérieure à l'évacuation de celle-ci, le réacteur devrait-il être arrêté ou devrait-on réduire la puissance par une baisse contrôlée de

puissance afin de ramener l'équilibre thermique? La réponse à cette question dépend du moment et de l'importance du déséquilibre thermique. Habituellement, un arrêt du réacteur fera baisser la puissance du réacteur à ~6 à 7 % PP en quelques secondes, alors qu'une baisse contrôlée de puissance au taux de 0,5 %/s y parviendra en ~3,5 minutes. Il est clair que nous ne pouvons faire face à un déséquilibre grave entre la production de chaleur et l'évacuation de la chaleur en ~3,5 minutes. Par conséquent, le réacteur doit être mis à l'arrêt.

Les systèmes d'arrêt doivent insérer une plus grande quantité de réactivité négative qui sera plus rapide que l'accumulation de réactivité positive générée par la défaillance du réacteur.

Le SAU#1 et le SAU#2 sont habituellement déclenchés en moins d'une seconde, et en moins de deux secondes, suffisamment de réactivité négative est insérée pour mettre un terme aux défaillances.

4.1.2 Types de systèmes d'arrêt

Dans les réacteurs CANDU, il existe trois types de systèmes d'arrêt : les barres d'arrêt, l'injection de poison liquide et le réservoir de drainage. Les nouveaux réacteurs construits dans les années 80 possèdent deux systèmes d'arrêt : les barres d'arrêt et l'injection de poison. Les réacteurs construits auparavant utilisaient un réservoir de drainage comme méthode d'arrêt.

Barres d'arrêt (BA)

Des barres creuses en cadmium (puissant absorbeur de neutron) contenues dans de l'acier inoxydable sont descendues par gravité dans le cœur. Des tubes guides verticaux se trouvent dans la calandre et guident les barres lorsqu'elles descendent dans le cœur. Ces barres sont habituellement maintenues au-dessus du cœur par un dispositif d'embrayage électrique, situé dans le plancher des dispositifs de contrôle de la réactivité. Lorsque le système d'arrêt est déclenché, le dispositif d'embrayage qui maintient les barres au-dessus du cœur fait descendre les barres dans le cœur (par des contacts électriques canalisés), (l'accélération initiale étant assistée par des ressorts, qui sont comprimés par les barres rétractées). Cela rend le réacteur fortement sous-critique, et ainsi la puissance du réacteur diminue rapidement à un faible niveau.

Injection de poison liquide

Le système d'arrêt par injection de poison liquide fonctionne par injection d'une solution de nitrate de gadolinium, sous pression, par

des conduites de dispersion horizontales dans le modérateur. Le gadolinium est un puissant absorbeur de neutrons. Ce système comprend plusieurs réservoirs de nitrate gadolinium (poison) dont le contenu peut être déversé dans le cœur par de l'hélium pressurisé. Lorsque ce système d'arrêt est déclenché, une pression d'hélium est appliquée aux réservoirs de poison par des vannes dans les canaux. Le poison est alors déplacé et distribué dans le modérateur, ce qui a pour effet une baisse rapide de la puissance à un faible niveau, comme le font les barres d'arrêt.

Réservoir de drainage

Certains des premiers réacteurs CANDU utilisaient un drainage du modérateur pour assurer une mise à l'arrêt. Il suffisait de déverser du modérateur dans un réservoir de drainage distinct sous la calandre. Lorsque le modérateur sortait de la calandre, les neutrons de fission rapide ne sont plus ralentis ou thermalisés et, par conséquent la puissance du réacteur diminue à un niveau faible et sûr.

En raison du temps d'action relativement lent de ce système, le drainage du modérateur n'est plus une méthode principale de mise à l'arrêt. Elle n'est utilisée que lorsque les barres d'arrêt ne permettent pas de réduire assez rapidement la puissance du réacteur.

4.1.3 Récupération après le déclenchement du système d'arrêt

Il est possible de remettre à zéro le déclenchement des barres d'arrêt (si la cause de l'arrêt est connue et corrigée), ce qui permettra d'éviter une panne due au poison. La récupération immédiatement après le déclenchement d'une injection de poison liquide est impossible, en raison du temps requis pour que le circuit d'épuration du modérateur élimine le poison. C'est pourquoi le déclenchement des BA (SAU#1) est le système d'arrêt préféré et est actionné en premier lieu.

4.1.4 Principes de sûreté

Afin d'éviter que les défaillances d'un système de sûreté aient une incidence sur un autre système, les systèmes d'arrêt d'urgence sont indépendants :

- Les uns des autres
- Du système de régulation du réacteur
- De tout système de procédé, par exemple le SAU#1 qui utilise la puissance pour ouvrir les contacts, le SAU#2 qui utilise les vannes actionnées pour causer l'injection de poison.

- Des autres systèmes liés à la sûreté (SRUC, confinement)

Chaque SAU est indépendant de l'autre SAU sous deux rapports :

1. L'indépendance fonctionnelle est assurée en concevant les deux systèmes d'arrêt selon deux principes différents : insertion mécanique d'un puissant absorbeur de neutrons et empoisonnement chimique du modérateur par un absorbeur de neutrons.
2. L'indépendance géométrique est assurée par l'insertion verticale de barres d'arrêt alors que le poison liquide est injecté par des tubes horizontaux dans le cœur.

Caractéristiques à sûreté intégrée

Nous devons nous assurer que les systèmes d'arrêt d'urgence sont à sûreté intégrée. Cela signifie que, en cas de défaillance de l'équipement, de problèmes de puissance ou d'une autre défaillance des systèmes d'arrêt, ceux-ci mettront à l'arrêt le réacteur (même s'il ne s'agit pas d'un arrêt réel). Cela permet de s'assurer que la puissance du réacteur sera réduite en cas de défaillance des systèmes d'arrêt. La sûreté intégrée, dans ce cas, signifie que la défaillance d'un composant ou d'un canal fera en sorte que le dispositif se mettra à la position où il devrait aller si le système était déclenché.

Par exemple, dans le cas du SAU#1, les BA sont maintenues au-dessus du cœur par des dispositifs d'embrayage électrique. En cas de défaillance de puissance des dispositifs, ceux-ci sont coupés de la source d'énergie et les BA sont insérées dans le cœur, ce qui met à l'arrêt le réacteur.

Dans le cas du SAU#2, de l'hélium sous pression est isolé des réservoir de stockage de poison par des vannes à action hyperstatique à déclenchement pneumatique. S'il y a une défaillance de l'air des instruments et que les actionneurs de vanne perdent de la pression, les vannes s'ouvriront. L'hélium pressurisé insérera le poison des réservoirs de stockage dans le cœur, ce qui mettra à l'arrêt le réacteur. Les réservoirs d'air raccordés aux actionneurs assurent l'alimentation en pression d'air des instruments par une vanne anti-retour. La vanne anti-retour permet d'éviter que l'air dans le réservoir retourne dans le système d'air défectueux. Une perte d'alimentation d'air ne causera pas automatiquement un arrêt, étant donné que l'air stocké maintiendra la vanne en position fermée. À noter également qu'un déclenchement réel déchargera de l'air de manière normale.

Cette caractéristique à sûreté intégrée ne convient pas à toutes les défaillances. Par exemple, les défaillances comme des vannes d'injection d'hélium qui demeurent fermées ou des BA coincées à la sortie du cœur ne peuvent être compensées. Ces types de défaillances ne sont pas annoncés et seraient détectés par des essais des systèmes de sûreté. Cela illustre pourquoi on doit effectuer des essais sur les systèmes passifs.

Dispositifs de verrouillage

Lors d'un arrêt du réacteur par les systèmes d'arrêt, le système de régulation du réacteur n'augmentera pas les niveaux de puissance. Il faudra également prendre les mesures de sûreté additionnelles suivantes dans ce cas :

- Remplissage des zones liquides
- Baisse des barres absorbantes dans le cœur
- Baisse de la valeur seuil de la puissance du réacteur.

Ces mesures de sûreté additionnelles permettent de s'assurer que le système de régulation du réacteur appuie les mesures prises par le système d'arrêt. En outre, l'insertion de barres absorbantes permet d'éviter que le réacteur ne devienne critique au moment du retrait des BA lorsque l'arrêt est terminé.

Lorsque le réacteur est arrêté, des dispositifs de verrouillage permettent d'éviter l'enlèvement du poison du modérateur et la sortie des barres de commande et des barres de compensation hors du cœur. Cela permet d'éviter une augmentation de la réactivité par inadvertance.

Les restrictions relatives au dispositif de verrouillage demeurent valides lorsque les systèmes d'arrêt sont de nouveau fonctionnels (à l'équilibre).

Arrêts absolus et conditionnels

Les arrêts du réacteur sont de deux types :

1. Absolus
2. Conditionnels

Un arrêt absolu est un arrêt qui est fonctionnel pour tous les états de puissance du réacteur.

Le taux-log est un arrêt absolu. Sa valeur d'arrêt pour le SAU#1 est réglée à 10 % de la puissance actuelle (PA)/seconde à n'importe quelle puissance. Si l'augmentation de puissance de réacteur est trop rapide pour être gérée de manière sûre par le système de régulation du réacteur, les systèmes d'arrêt arrêteront le réacteur.

D'autres exemples des arrêts absolus comprennent notamment :

- La puissance neutronique élevée qui assure une protection contre la surpuissance du combustible en tout temps
- La pression élevée du circuit caloporteur qui assure une protection contre la surpression dans le CC et contre des dommages résultant d'un APRP.

Un arrêt conditionnel est valide seulement au-dessus de certaines limites de puissance. Les arrêts conditionnels permettent au réacteur d'être mis à l'arrêt sans arrêter complètement le réacteur, en maintenant les systèmes d'arrêt à l'équilibre. Selon les paramètres, ces arrêts peuvent être prévus pour différents niveaux.

Les arrêts conditionnels protègent également contre les augmentations de la puissance du réacteur à partir de la faible puissance en étant réactivé au niveau de conditionnement. À mesure que la puissance du réacteur augmente, les paramètres de conditionnement de l'arrêt seront satisfaits au niveau de puissance approprié et arrêteront le réacteur, en évitant toute augmentation de puissance additionnelle.

Par exemple, la faible pression dans le CC est un arrêt conditionnel. Cet arrêt dû à une faible pression dans le CC protège contre l'assèchement dans des conditions de puissance élevée (c'est-à-dire afin d'éviter l'ébullition/l'assèchement). Pendant l'arrêt ou le refroidissement d'un réacteur, la pression dans le CC peut être réduite. À mesure que la puissance du réacteur diminue, jusqu'à atteindre un niveau inférieur au niveau conditionnel, l'arrêt dû à une faible pression dans le CC est conditionné. Cela permet d'éviter qu'il y ait arrêt imprévu du réacteur. À de faibles niveaux de puissance, le combustible sera froid et l'assèchement risque moins de se produire. Lorsque la pression CC est plus faible, la sûreté du réacteur n'est pas compromise, car la capacité d'évacuation de la chaleur du combustible fonctionne bien. Mais supposons que la puissance du réacteur augmente de manière imprévue à partir de l'état à faible puissance avec faible pression dans le CC. À des puissances supérieures au niveau de conditionnement, l'ébullition et l'assèchement peuvent se

produire dans le circuit caloporteur à mesure que la température du combustible augmente. L'augmentation de puissance causerait un arrêt du réacteur lorsque la puissance a atteint le niveau de conditionnement, évitant ainsi l'assèchement.

Un autre arrêt conditionnel est le faible niveau du caloporteur brut du circuit caloporteur. Par exemple, la valeur seuil du déclenchement est habituellement réglée entre 75 % et 90 % de l'écoulement nominal, en autant que la puissance du réacteur soit supérieure à ~1 % PP. Si la puissance du réacteur est inférieure à ~1 % PP, alors l'arrêt est conditionné. La circulation complète du caloporteur n'est pas requise pour évacuer cette chaleur (d'autres sources froides ont cette capacité).

Même avec une circulation réduite, l'assèchement ne se produira pas, étant donné que le combustible est froid. Cet arrêt conditionnel permet de fermer les pompes principales du CC pendant l'arrêt du réacteur. Une augmentation de la puissance du réacteur au-delà du niveau de conditionnement sans circulation adéquate du caloporteur entraînerait un arrêt du réacteur, évitant ainsi l'assèchement.

Voici d'autres exemples d'arrêts conditionnels :

- Faible niveau du générateur de vapeur;
- Faible niveau du pressuriseur.

Protection contre le déclenchement

Les variables clés de la neutronique et des systèmes de procédé sont surveillées en tout temps. Ces variables de réacteur ont des valeurs prédéterminées pour ce qui est du déclenchement. Lorsque les variables clés du réacteur dépassent les valeurs prédéterminées pour le déclenchement, le système d'arrêt est actionné et arrêtera le réacteur.

Les valeurs prédéterminées des systèmes d'arrêt pour le SAU#1 et le SAU#2 sont étagées afin de permettre au SAU#1 d'être actionné en premier lieu, ce qui rend possible une récupération du déclenchement (discutée à la section portant sur les valeurs prédéterminées étagées pour le déclenchement).

Bien que l'ensemble des paramètres de déclenchement varie d'une centrale à une autre, les variables clés les plus courantes sont énumérées dans les pages suivantes.

1. Puissance neutronique élevée

La valeur du déclenchement est réglée en dessous du niveau auquel la puissance nominale (puissance de canal critique) serait dépassée. Cela permet d'éviter les augmentations excessives résultant d'un APRP grave (où il y a eu vidage des canaux) ou durant un APR (où le taux est suffisamment bas pour qu'il n'y ait pas de déclenchement à cause du taux de neutrons et que la pression dans le CC n'augmente pas au-delà de la capacité de contrôle de la pression et de l'inventaire).

2. Taux de neutrons (taux-log ou taux linéaire)

Permet d'éviter que la puissance du réacteur augmente si rapidement que le SRR soit incapable de limiter efficacement la puissance de pointe atteinte (perte de contrôle du réacteur). Cela pourrait se produire durant un APRP grave, tel que mentionné précédemment, ou durant un APR rapide.

3. Pression élevée dans le circuit caloporteur

Cet arrêt constitue une protection contre la surpressurisation excessive du CC due à la perte d'efficacité des sources froides. Il protège également contre certains accidents, tels un APR lent (ou modéré) (le système de contrôle de la pression et de l'inventaire ne peut pas gérer le gonflement), une perte d'eau d'alimentation, ou une perte d'alimentation de catégorie IV.

4. Faible pression dans le circuit caloporteur

Ce type d'arrêt vise d'abord à gérer les effets des APRP et les ruptures de conduites qui entraînent une diminution rapide de la pression dans le CC. Cet arrêt empêche la puissance de canal critique de diminuer en raison d'une réduction de la pression du CC. Il permet également d'éviter l'assèchement, ainsi que la surchauffe et la défaillance du combustible résultantes.

5. Écoulement brut de caloporteur à faible débit

Cette variable d'arrêt est utilisée pour gérer les effets des APRP et la perte d'alimentation de catégorie IV lorsque l'arrêt des pompes donne lieu à une circulation réduite dans le CC. L'arrêt à faible débit permet d'éviter que la puissance de canal critique diminue suite à une réduction de

l'écoulement dans le CC. Cela permet d'éviter l'assèchement ainsi que la surchauffe et la défaillance du combustible résultantes.

6. Faible niveau du pressuriseur

Cet arrêt vise à contrer les effets des accidents causant un manque d'inventaire du D₂O dans le CC, comme des APRP ou des ruptures de conduites (qui causent un retrait du caloporteur et une réduction de la pression – voir également la section portant sur l'arrêt suite à une faible pression dans le CC).

7. Faible niveau du générateur de vapeur

Cet arrêt vise à contrer les effets des défaillances dans le circuit de vapeur et d'eau d'alimentation, c'est-à-dire les ruptures des conduites de vapeur et d'eau d'alimentation. Ce paramètre arrête le réacteur lorsque les générateurs de vapeur sont perdus (ou que l'on prévoit les perdre) à titre de source froide.

8. Faible pression de l'eau d'alimentation dans le générateur de vapeur

Cet arrêt vise à réagir aux défaillances dans le circuit d'eau d'alimentation (ruptures des conduites de vapeur, défaillances des pompes, etc.). Ce paramètre arrête le réacteur lorsque les générateurs de vapeur sont perdus (ou que l'on prévoit les perdre) à titre de source froide.

9. Température élevée dans le modérateur

Cet arrêt se fait en réaction à une perte de modérateur comme source froide. Dans les centrales qui utilisent des survolteurs, la température élevée du caloporteur (modérateur) déclenche l'arrêt du réacteur afin d'éviter que le survolteur ne soit endommagé.

10. Pression élevée dans le bâtiment réacteur

Cet arrêt vise à contrer les effets d'un APRP ou de la rupture d'une conduite d'eau d'alimentation/de vapeur à l'intérieur du confinement.

11. Température élevée dans le circuit caloporteur

Cet arrêt vise à contrer la surchauffe du combustible et à protéger contre la surpression dans le CC à titre de mécanisme de secours en cas de perte d'efficacité des sources froides (réacteurs sans ébullition seulement).

Paramètres redondants

Plusieurs combinaisons possibles de paramètres de déclenchement sont possibles dans le réacteur :

En cas de production de chaleur excessive (dépassant la capacité des sources froides),

- Taux de neutrons
- Puissance neutronique élevée

En cas de non-concordance entre la production et l'évacuation de chaleur,

- Pression élevée dans le circuit caloporteur
- Température élevée dans le circuit caloporteur

Les non-concordances imminentes sont protégées par :

- Faible niveau du générateur de vapeur
- Faible pression dans la conduite d'alimentation du générateur de vapeur
- La température élevée du modérateur permet de s'assurer que le bilan thermique est maintenu dans le modérateur

En cas de perte, ou de perte imminente du circuit CC :

- Écoulement brut de caloporteur à faible débit
- Pression élevée dans la salle des générateurs de vapeur
- Faible pression dans le CC
- Faible niveau du pressuriseur

En fait, pour une même défaillance de réacteur, le réacteur possède une combinaison de protections contre le déclenchement. Si l'une ou l'autre des protections contre le déclenchement subit une défaillance, les autres permettront de mettre à l'arrêt le réacteur. Ces paramètres redondants sont une caractéristique de conception importante, qui contribue largement à la sûreté des réacteurs CANDU.

À titre d'exemple, une combinaison d'effets/de protection contre le déclenchement en cas d'APRP pourrait être notamment :

- a) Vidage dans les tubes de force. Cela cause une augmentation abrupte de la puissance du réacteur due à un coefficient de réactivité du vide positif. Le taux de neutrons et la puissance neutronique élevée assurent une certaine protection.
- b) Dépressurisation du circuit caloporteur due à la perte de caloporteur (D_2O). L'arrêt en cas de faible pression dans le circuit caloporteur assure une certaine protection.
- c) Augmentation de la pression dans la salle des générateurs de vapeur. Le D_2O du CC, qui s'échappe à pression et à température élevées, passe à l'état vapeur, ce qui cause une augmentation de pression. L'arrêt dû à une pression élevée dans la salle des générateurs de vapeur est disponible.
- d) Diminution de l'écoulement du caloporteur lorsqu'il y a rupture d'un collecteur d'entrée. Le D_2O s'écoulant dans le canal serait perdu suite à la rupture. L'arrêt associé à l'écoulement brut de caloporteur à faible débit est disponible.
- e) Diminution du niveau du pressuriseur suite à la perte du D_2O du circuit caloporteur. L'arrêt dû au faible niveau du pressuriseur est disponible.

Seuil de déclenchement (valeurs étagées)

À noter également que les valeurs seuil du déclenchement sont étagées pour le SAU#1 et le SAU#2 afin d'éviter d'actionner les deux systèmes en même temps. Cela maintient le SAU#2 à l'équilibre et prêt à être actionné, au cas où le SAU#1 ne réussirait pas à faire baisser la puissance du réacteur. En outre, une récupération de cet arrêt est possible pour le SAU#1 si la cause de l'arrêt peut être identifiée et corrigée rapidement. Avec le SAU#2, nous ne disposons pas de cette option parce que l'enlèvement du poison hors du modérateur prend trop de temps. Par conséquent, une fois que le SAU#2 a été actionné, une panne due au poison ne peut être évitée.

À titre d'exemple, la valeur de déclenchement TAUX-LOG habituelle est réglée à 10 % PA/seconde pour le SAU#1 et à 15 % PA/seconde pour le SAU#2.

Arrêts manuels

Si l'opérateur a des raisons de croire qu'une défaillance grave du réacteur s'est produite et que l'arrêt automatique n'a pas eu lieu, le réacteur doit être arrêté manuellement même si un arrêt automatique ne s'est pas encore produit. Il s'agit là d'une caractéristique de sûreté additionnelle ajoutée aux réacteurs CANDU.

4.1.5 Notions principales

- Les systèmes d'arrêt d'urgence protègent contre la perte de contrôle du réacteur et contre la perte d'efficacité des sources froides.
- Le système d'arrêt d'urgence doit insérer suffisamment de réactivité et ce, rapidement, pour contrecarrer toute défaillance du réacteur ou toute combinaison de défaillances afin d'éviter des défaillances à la limite du circuit caloporteur. Le système d'arrêt doit être un système à sûreté intégrée afin de pouvoir arrêter le réacteur en cas de défaillance d'un composant ou d'une source d'alimentation électrique.
- Le rôle des mécanismes de verrouillage des systèmes d'arrêt d'urgence consiste à éviter toute augmentation par inadvertance de la réactivité.
- Un paramètre de déclenchement absolu est un paramètre de déclenchement qui est valide à tous les niveaux de fonctionnement du réacteur. Un paramètre d'arrêt conditionnel est seulement valide au-dessus d'un certain niveau de puissance du réacteur. Cela permet au système d'arrêt de demeurer à l'équilibre (état souhaitable) durant une mise à l'arrêt.
- Un APR rapide entraînera un arrêt dû au taux de neutrons. Le paramètre du taux de neutrons a été choisi en raison du fait que l'augmentation rapide de la puissance sera détectée et arrêtera le réacteur.
- Un APR lent entraînera un arrêt du réacteur dû à une puissance neutronique élevée ou à une pression élevée dans le circuit caloporteur (selon l'augmentation du taux de puissance). Si les

augmentations de la puissance du réacteur causent un gonflement important du CC à mesure que l'apport de chaleur augmente, la pression dans le CC augmentera. Si l'augmentation de la puissance du réacteur est suffisamment lente pour maintenir l'augmentation de pression à l'intérieur de la capacité du système de contrôle de la pression et de l'inventaire, la puissance du réacteur augmentera jusqu'à la valeur seuil du déclenchement à cause de la puissance neutronique élevée.

- Une perte d'efficacité des sources froides arrêtera le réacteur en cas de pression ou de température élevées dans le circuit caloporteur. Ces paramètres ont été choisis en raison du fait que la réduction de l'efficacité des sources froides causera une augmentation de la température dans le CC, ce qui entraînera un gonflement immédiat dans le CC. L'arrêt dû au faible niveau du générateur de vapeur et à la faible pression de l'eau d'alimentation du générateur de vapeur protège également contre la réduction de la capacité d'agir comme source froide (à titre de paramètre d'arrêt de secours).
- Les paramètres redondants permettent de s'assurer que le réacteur s'arrête même s'il y a défaillance d'un paramètre d'arrêt. Il s'agit là d'une caractéristique de sûreté additionnelle de la conception des systèmes d'arrêt d'urgence.
- Pour améliorer la sûreté du réacteur, le réacteur doit être arrêté manuellement si l'opérateur estime qu'une défaillance grave du réacteur s'est produite, même si le réacteur ne s'est pas arrêté tout seul.

4.2 Refroidissement d'urgence du cœur par injection

Cette section porte sur le rôle du SRUC par injection, sa mise en marche et son fonctionnement. Un système de type courant est illustré à la figure 4.1.

4.2.1 Rôle du SRUC par injection

Le système de refroidissement d'urgence du cœur (SRUC) par injection fait partie intégrante de la philosophie de défense en profondeur qui régit le fonctionnement des réacteurs CANDU. À titre de rappel, mentionnons que cette méthode prévoit la présence de cinq barrières conçues pour réduire au minimum les rejets de produits de fission dans l'environnement. Ce sont :

- Combustible de céramique
- Gaine de combustible
- Tube de force
- Confinement
- Zone d'exclusion.

Le SRUC par injection est à l'équilibre lorsque le réacteur est dans un état de fonctionnement normal. Il fonctionne automatiquement pour refroidir le circuit caloporteur en cas d'accident dû à la perte de caloporteur. Un écoulement d'eau ordinaire est injecté afin de remplir le circuit caloporteur, humidifier le combustible et fournir une source froide pour la chaleur résiduelle et la chaleur de désintégration.

À noter que dans le cas des ruptures importantes, le caloporteur s'échappant par la brèche sera suffisant pour évacuer la chaleur du combustible (bien que les générateurs de vapeur soient toujours la première source froide). Dans le cas des ruptures moins importantes, où la décharge du caloporteur ne suffit pas à refroidir le combustible, d'autres méthodes d'évacuation de la chaleur doivent être utilisées (c.-à-d. dans les générateurs de vapeur en maintenant la circulation du caloporteur le plus longtemps possible).

La quantité de produits de fission rejetés par le combustible après un APRP dépendra de l'ampleur de l'APRP et de la manière dont le SRUC par injection s'est comporté. Lorsque le SRUC par injection est entièrement fonctionnel et qu'il permet de gérer un APRP, on ne s'attend pas à ce qu'il y ait beaucoup de combustible défectueux.

Si, pour une raison quelconque, le fonctionnement automatique du SRUC par injection ne fonctionne pas, l'opérateur peut intervenir à tout moment de la séquence des opérations et amorcer manuellement le SRUC par injection.

4.2.2 Accident dû à la perte de réfrigérant primaire (APRP)

Un APRP est défini comme étant une fuite de D₂O hors du circuit caloporteur, ce qui entraîne une basse pression dans le CC. Cela signifie que la pression normale dans le CC ne peut pas être maintenue ou que la récupération de pression à des niveaux normaux n'est pas prévue avant une période de temps défini, habituellement cinq à dix minutes.

Voici des exemples de perte de caloporteur (APRP) hors du circuit caloporteur :

- Rupture d'un collecteur
- Rupture d'un tube de force ou d'une conduite d'alimentation
- Défaillance d'un bouchon de glace alors que le circuit est ouvert pour l'entretien pendant une mise à l'arrêt.

Pendant un arrêt, l'APRP est détecté par une perte d'inventaire de D₂O dans le CC.

4.2.3 Exigences relatives au système d'appui

Le fonctionnement efficace du SRUC par injection doit suivre le fonctionnement d'un SAU (système d'arrêt d'urgence) ou des deux SAU. En cas d'APRP grave, la fuite peut causer une baisse de la pression dans le CC, ce qui fera passer à l'état de vapeur le caloporteur dans le CC (vidage). Le coefficient de vide d'un milieu à une grande augmentation de la réactivité positive et à un accroissement rapide de la puissance du réacteur. Le système de régulation du réacteur tente de contrôler cet accroissement de puissance, mais n'est pas conçu pour supporter des insertions aussi rapides de réactivité positive. Par conséquent, il y aura un arrêt automatique du réacteur par le SAU#1 ou par le SAU#2 initié par un arrêt dû au taux-log ou à la puissance neutronique élevée.

Pour les petits APRP (rupture d'une petite conduite d'alimentation ou d'instrumentation), la perte d'inventaire du CC sera suffisamment lente pour que le système de régulation du réacteur puisse gérer l'accroissement de puissance résultant.

Dans ces conditions, l'arrêt du réacteur sera initié par un paramètre autre que les arrêts dus au neutron, comme la basse pression dans le CC ou le faible niveau du pressuriseur.

Lors des APRP plus importants, l'augmentation résultante de la pression dans la voûte du réacteur due à la fuite de caloporteur qui passe à l'état de vapeur fera entrer en fonction certaines composantes du système de confinement. Cette action réduit le risque que de grandes quantités de produits de fission radioactifs soient rejetées dans l'environnement. La question sera examinée plus loin dans la section portant sur le confinement.

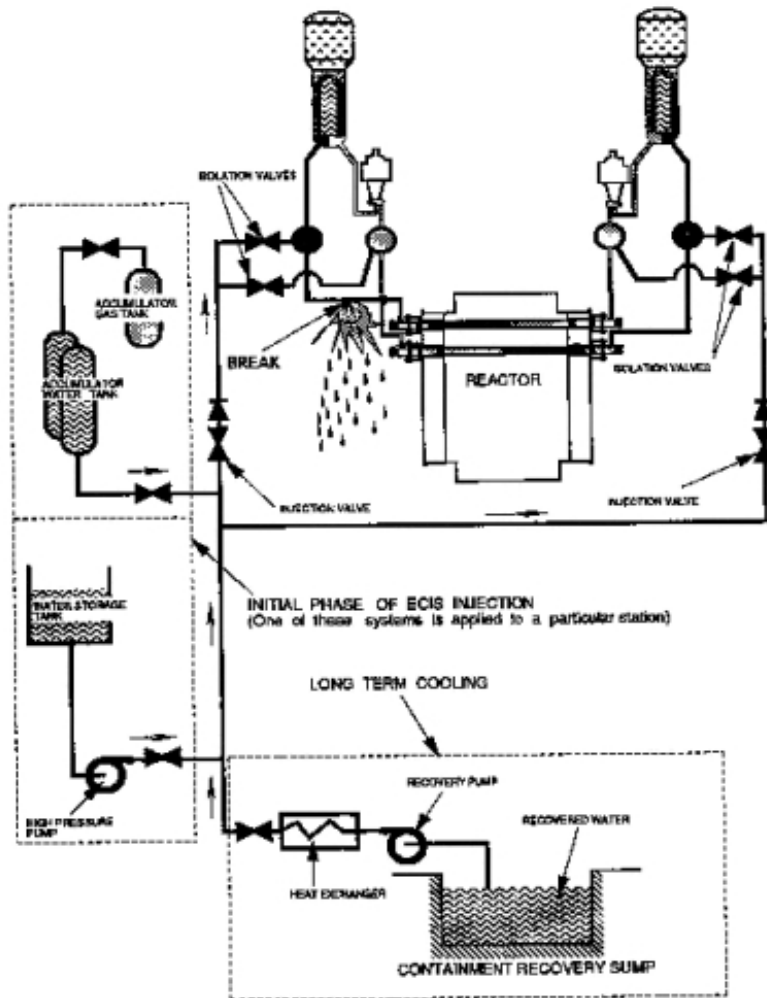


Figure 4.1 – SRUC simplifié

Isolation Valves	Vannes d'isolement
Accumulator Gaz Tank	Réservoir d'accumulation des gaz
Accumulator Water Tank	Réservoir d'accumulation d'eau
Break	Fuite
Reactor	Réacteur
Injection Valve	Vanne d'injection
Isolation Valves	Vannes d'isolement
Injection Valve	Vanne d'injection
Boiler Stockage Tank	Réservoir de stockage d'eau
Initial phase of ECIS Injection (One of these systems is applied to a particular station)	Phase initiale du SRUC par injection (Un de ces systèmes s'applique à une centrale particulière)

Long Term Cooling	Refroidissement à long terme
High Pressure Pump	Pompe haute pression
Recovery Pump	Pompe de récupération
Heat Exchanger	Échangeur de chaleur
Recovered Water	Eau récupérée
Containment Recovery Sump	Puisard de récupération du confinement

Remarque 1 : L'injection se fait soit par pompage ou par entraînement par un gaz, pas les deux

Remarque 2 : Le nombre et la position des vannes varient d'un endroit à l'autre dans le circuit. La position des vannes n'est pas indiquée.

4.2.4 Initiation du SRUC

Le SRUC par injection est mis en marche automatiquement lorsqu'un certain rapport est atteint (deux canaux sur trois, trois canaux sur quatre, selon la centrale) dans le circuit primaire et qu'au moins un paramètre conditionnel (qui varie également en fonction du nombre de canaux) est atteint. Dans tous les réacteurs CANDU, le paramètre primaire est la faible pression dans le CC. La pression (habituellement ~5 MPa) est bien en-dessus de la pression du CC qui entraînerait un arrêt du réacteur (habituellement 7 à 8 MPa).

Le paramètre conditionnel distingue l'événement comme étant un APRP, par opposition à une défaillance de procédé. Par exemple, une faible pression dans le CC peut être causée par une perte d'alimentation du CC, mais la basse pression en plus de l'augmentation de la pression dans la voûte pourrait indiquer qu'une perte de caloporteur se produit dans la voûte.

Les paramètres de conditionnement varient d'une centrale à une autre, mais peuvent comprendre la température élevée dans la voûte ou la pression élevée dans l'enceinte où le générateur de vapeur, le niveau élevé du modérateur (en cas d'APRP dans le modérateur), une faible pression continue dans le CC et un faible écoulement dans le CC.

4.2.5 Phases du SRUC par injection

On dénombre trois phases opérationnelles principales : purge, injection et récupération.

Purge

Une fois que le réacteur s'est arrêté, l'exigence primaire consiste à fournir une autre source d'eau de refroidissement au combustible (qui

approche maintenant des niveaux de la chaleur de désintégration) le plus rapidement possible. Le SRUC par injection peut seulement débiter lorsque la pression dans le circuit caloporteur a diminué à la valeur d'injection du SRUC. Cette période de dépressurisation porte habituellement le nom de purge. Au début, une réduction de la pression dans le CC se produit en raison de la fuite et du retrait du D₂O après l'arrêt du réacteur. Le taux de dépressurisation ralentira à mesure que la pression dans le CC atteint la pression de saturation associée à la température dans le CC. À cette pression, le caloporteur passe à l'état vapeur afin d'éviter toute baisse de pression dans le CC. Le temps requis pour cela dépend fortement de l'ampleur de l'APRP, et par conséquent la durée de la purge varie grandement.

Une fois que le SRUC a été déclenché, un refroidissement rapide des générateurs de vapeur est amorcé. Toutes les vannes de sûreté des générateurs de vapeur (ou les grandes vannes de rejet de vapeur dans certaines centrales) sont ouvertes afin de réduire la pression du générateur de vapeur (et par conséquent la température du générateur de vapeur) qui cause un retrait dans le CC. Cette baisse additionnelle de la pression dans le CC permettra à l'eau du SRUC plus froide d'entrer dans le réacteur et réduira également la fuite du taux d'inventaire hors du circuit caloporteur. Cela permet d'éliminer efficacement les générateurs de vapeur comme source de chaleur, ce qui pourrait maintenir la pression et la température dans le CC, en ralentissant la dépressurisation. (Une fois que l'eau froide du SRUC est injectée dans le CC, son rôle principal consiste à refroidir le combustible. Si l'eau froide est injectée sans refroidissement rapide, l'eau d'alimentation chaude dans les générateurs de vapeur transfèrera la chaleur à l'eau injectée et au CC.) Cela est particulièrement utile dans le cas des petits APRP, lorsque la dépressurisation du CC peut être lente. Cela permet à l'eau froide du SRUC d'être injectée plus rapidement.

Les pompes principales du CC maintiennent la circulation dans l'ensemble du circuit caloporteur le plus longtemps possible. Un débit de caloporteur plus élevé en provenance du cœur vers les générateurs de vapeur peut être assuré avec ces pompes. Cela donne lieu à un taux d'évacuation plus élevé de la chaleur en provenance du circuit caloporteur et, par conséquent, permet une dépressurisation plus rapide jusqu'à la pression d'injection. La circulation forcée mélange également les liquides et la vapeur (ce qui retarde la formation de poche de vapeur) et qui permet de maintenir le combustible mouillé, en réduisant ainsi les défaillances du combustible. Le pompage de l'écoulement biphasé et la cavitation des pompes dus à une faible

pression d'aspiration causera des vibrations importantes dans les pompes de circulation du CC. Afin d'éviter toute autre perte d'inventaire à cause des dommages causés au joint des pompes, il faudra peut-être arrêter les pompes (dans certaines centrales, des joints de pompe défectueux peuvent causer une brèche dans le confinement).

Comme nous l'avons mentionné pour le thermosiphon, l'inertie dans les moteurs des pompes principales du CC ou les volants d'inertie continuera à faire circuler le caloporteur pendant un certain temps après l'arrêt des pompes (mais cela peut être contré par le SRUC par injection).

Dans certaines centrales, des commandes à bas régime sont installées sur les pompes principales du CC, et continuent à assurer la circulation du caloporteur afin d'assurer le refroidissement du combustible. Ces commandes à bas régime permettront à la pompe de fonctionner sans cavitation. Cela est particulièrement utile en cas de petites fuites, où la décharge de caloporteur en provenance de la brèche n'est pas suffisante pour transporter la chaleur en provenance du combustible (tel que mentionné précédemment dans ce module).

Injection

À la pression d'injection du SRUC, l'injection d'eau dans le circuit commence à restaurer l'inventaire du caloporteur. Cette phase porte le nom de phase d'injection. L'injection d'eau ordinaire en provenance d'un ou de plusieurs réservoirs de stockage continue jusqu'à ce que l'inventaire du réservoir se soit épuisé. La durée de la phase d'injection varie selon la taille de la brèche et l'inventaire d'eau disponible.

L'injection à pression élevée se fait par deux méthodes. Certaines centrales utilisent des pompes haute pression pour injecter le caloporteur (eau ordinaire) dans le cœur. Les autres centrales utilisent un gaz pressurisé (N_2) pour amener l'eau d'injection dans le cœur.

Dans certaines centrales, un réservoir à élévation du niveau ou un réservoir de stockage d'eau d'urgence dont le niveau est élevé (faisant partie du réservoir d'aspersion réservé pour l'injection) permet de compléter l'inventaire d'eau disponible pour l'injection. Une fois que la phase d'injection haute pression est terminée, l'eau basse pression commence à être pompée de ces réservoirs. Cette eau additionnelle est particulièrement utile pour faire le pont entre l'injection haute pression et la phase de récupération.

Les pressions d'injection du SRUC haute pression courante se situent entre 4,2 et 5,5 MPa, selon la centrale et la méthode utilisée.

Cette plage de pression d'injection est choisie pour trois raisons principales :

- a) Le coût additionnel du système requis pour fournir l'écoulement équivalent à la pression élevée (particulièrement dans un système de pompe) n'est pas justifié.
- b) Cela permet de réduire le temps et le nombre d'occasions pendant lesquelles le SRUC doit être bloqué lorsqu'il fonctionne à pression réduite dans le CC.
- c) Cela permet de réduire les effets des coûts de bélier.

Le point b) est important parce que l'une des décisions logiques requises pour l'injection consiste à déterminer si la pression dans le CC est inférieure à la pression d'injection du SRUC.

La taille du système et la pression d'injection est optimisée afin de permettre un écoulement d'injection adéquat ainsi qu'une pression adéquate avant que l'inventaire du CC ait été épuisé. Cela permet d'éviter des défaillances du combustible qui pourraient se produire pendant la purge.

Récupération

La purge du CC et l'injection du SRUC peuvent causer la décharge de grandes quantités d'un mélange d'eau ordinaire et d'eau lourde hors de la brèche. Cette eau est recueillie par les puisards de récupération du SRUC dans le plancher du confinement. Elle est alors refroidie dans les échangeurs de chaleur et réinjectée dans le circuit caloporteur par des pompes de récupération (ou, dans certaines centrales, vers l'aspiration des pompes d'injection haute pression). On appelle cela la phase de récupération (ou le refroidissement à l'eau après un incident, dans certaines centrales). Dans la plupart des centrales, un système de récupération joue ce rôle. Il maintient le refroidissement adéquat dans le circuit caloporteur et constitue une source froide à long terme pour le réacteur permettant d'éviter les défaillances du combustible (en raison de la surchauffe produite par la chaleur de désintégration).

Le mécanisme d'évacuation de la chaleur de désintégration est indiqué à la figure 4.2.

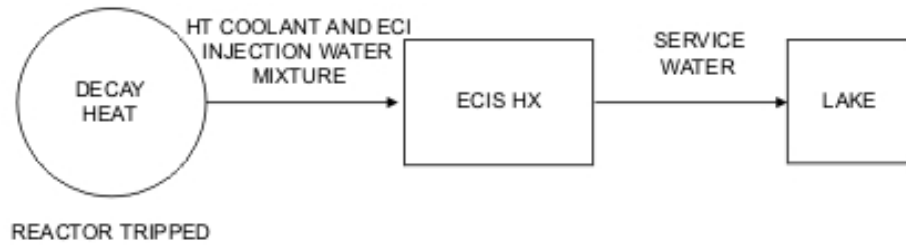


Figure 4.1 – Chaîne d'évacuation de la chaleur du SRUC par injection

Decay Heat	Chaleur de désintégration
Reactor Tripped	Réacteur à l'arrêt
HT Coolant and ECI injection Water Mixture	Mélange de caloporteur du CC et d'eau injectée par le SRUC
ECIS HX	Échangeur de chaleur du SRUC par injection
Service Water	Eau de service
Lake	Lac

La quantité d'eau injectée durant les phases d'injection HP et BP doit être suffisante pour compenser la perte d'eau due à la retenue dans le trajet d'écoulement de récupération. Elle doit également fournir une hauteur d'aspiration de la pompe de récupération suffisante pour éviter la cavitation et le blocage de la vapeur des pompes de récupération. L'eau récupérée par les puisards de récupération doit être filtrée afin d'éviter que des débris ne bloquent l'entrée des pompes et ne compromettent la phase de récupération. Pour cette raison, il est très important d'assurer un entretien adéquat à l'intérieur de l'enceinte du réacteur.

Les pompes de récupération n'ont pas besoin de la capacité haute pression (et à écoulement élevé) de la phase d'injection, étant donné que le circuit caloporteur fonctionne à pression réduite. En outre, la chaleur de désintégration produite par le réacteur est considérablement réduite à long terme. Par conséquent, le circuit de récupération a une taille différente, pour le rendement à long terme avec une pression et un écoulement réduits.

La durée de la phase de récupération peut atteindre trois mois. Pour cette raison, il est important de disposer d'une source d'alimentation électrique sûre pour les pompes de récupération. Par conséquent, on utilise l'alimentation électrique de catégorie III.

4.2.6 Fonctionnement du SRUC par injection

À noter que le SRUC par injection peut différer d'une centrale à une autre. Nous allons décrire de façon générale un SRUC de type courant. Toute différence sera examinée lors de la formation portant sur votre centrale.

Une fois que la pression d'initiation du SRUC par injection est atteinte et qu'au moins un paramètre de conditionnement est respecté, les mesures suivantes peuvent être prises :

- Refroidissement rapide, tel que vu précédemment dans le module;
- Préparation pour l'injection HP (et l'injection pompée BP);
- Préparation pour la phase de récupération du fonctionnement du circuit.

Dans le cas des circuits qui utilisent des accumulateurs de gaz, des vannes à action rapide s'ouvrent afin de permettre au gaz pressurisé contenu dans les accumulateurs de pressuriser l'eau retenue dans les réservoirs de stockage de l'eau des accumulateurs. Les vannes d'injection de H₂O et de D₂O du réacteur s'ouvriront seulement dans le réacteur touché pour permettre un écoulement d'injection. Le séquençage et le fonctionnement des vannes SRUC sont conçus pour réduire au minimum les effets des coûts de bélier, qui pourraient survenir en raison de l'injection rapide d'eau (les vannes s'ouvrent lentement, le circuit est aéré afin d'évacuer les écarts anti-retour, etc.). L'injection se poursuivra jusqu'à ce qu'un faible niveau soit atteint dans le réservoir de stockage de l'eau des accumulateurs. Les vannes d'isolement se fermeront alors afin d'éviter toute entrée de gaz dans le circuit caloporteur. Les pompes de récupération commenceront également lorsque le SRUC par injection sera mis en marche, en préparation pour l'écoulement de récupération.

Dans le cas des circuits qui utilisent des pompes à eau haute pression, l'eau dans le réservoir de stockage du SRUC alimente l'aspiration de ces pompes. Ces pompes sont mises en marche lorsque le SRUC par injection est amorcé (ou lorsqu'un paramètre de conditionnement est respecté, selon la centrale), en préparation pour l'écoulement d'injection.

Les pompes de récupération sont également démarrées et permettront de recirculer l'eau d'injection. Les vannes d'injection de H₂O et de D₂O du réacteur s'ouvriront (seulement dans le réacteur touché) afin de

permettre un écoulement d'injection (il s'agit de mesures préventives contre les coups de bélier, comme nous l'avons mentionné plus tôt). L'injection se poursuivra jusqu'à ce qu'un faible niveau dans le réservoir de stockage d'eau soit atteint (ou dans certaines centrales, lorsqu'une limite de temps préétablie est dépassée). Les vannes d'isolement se ferment afin d'éviter l'entrée d'air dans les pompes et dans le SRUC par injection.

Dans certaines centrales, au terme de l'injection haute pression initiale, des réservoirs de stockage d'eau à élévation du niveau ou des réservoirs de stockage d'eau d'urgence fourniront l'eau additionnelle. Les vannes du réservoir s'ouvrent et des pompes de récupération déchargent cette eau dans le cœur du réacteur. Cette phase se poursuit jusqu'à ce qu'un faible niveau préétabli dans le réservoir soit atteint, ou qu'un niveau élevé préétabli dans le puisard de récupération soit atteint. Cela permet de s'assurer que la quantité d'eau adéquate est disponible pour la phase de récupération. Les vannes d'isolement du réservoir de stockage seront alors fermées.

Une fois que les injections mentionnées précédemment sont terminées, la phase de récupération (refroidissement de l'eau après un accident) débute. L'eau qui s'est déversée du réacteur a été recueillie par le puisard de récupération. Les vannes d'isolement du puisard de récupération sont alors ouvertes et l'écoulement de récupération débute. L'eau sera pompée du puisard de récupération vers les échangeurs de chaleur de récupération. Ensuite, l'eau est retournée au cœur du réacteur pour refroidir le combustible. Dans les échangeurs de chaleur de récupération, la chaleur de désintégration du réacteur est transférée à l'eau de refroidissement.

4.2.7 Fiabilité du système de refroidissement d'urgence du cœur par injection

Comme les deux systèmes d'arrêt d'urgence, une fiabilité élevée est assurée pour conserver l'indépendance, le caractère redondant et le choix de composants de qualité élevée pour la construction et l'entretien du système.

4.2.8 Différents états du SRUC par injection

Examinons maintenant les différents états de préparation dans lesquels peut se trouver le SRUC par injection : à l'équilibre, bloqué, disponible.

À l'équilibre

Lorsque le système est à l'équilibre, il peut fonctionner automatiquement lorsque les valeurs seuil des paramètres d'initiation sont atteintes pour le bon nombre de canaux. Aucune mesure de l'opérateur n'est requise.

Bloqué

Lorsque le système est bloqué, il ne fonctionne pas automatiquement. Lorsque le circuit caloporteur principal est dépressurisé, une injection automatique est évitée par un commutateur manuel, qui assure l'ouverture automatique des vannes de contrôle d'injection. Cela permet d'amorcer le système lorsque la pression du circuit caloporteur diminue en dessous de la pression d'injection du SRUC. Le résultat de l'injection est une addition de H₂O et une baisse de la teneur isotopique de l'eau lourde du CC qui pourrait entraîner un fardeau économique considérable.

Cependant, le blocage du SRUC par injection n'est permis qu'une fois que la température du circuit caloporteur est descendue sous la valeur spécifiée (habituellement <90 °C) ou lorsque la pression dans le CC est égale ou inférieure à la pression d'injection (cela peut se faire avant que les paramètres de conditionnement du SRUC soient respectés). Un système bloqué n'a qu'à être actionné de la salle de commande pour être ramené à l'état d'équilibre.

Lorsque le circuit caloporteur est dépressurisé pour l'entretien et que le SRUC par injection est bloqué, le SRUC par injection peut être amorcé manuellement en cas d'APRP. Il convient de noter également que lorsque le SRUC subit une défaillance de son fonctionnement automatique, pour n'importe quelle raison, l'opérateur peut amorcer manuellement le SRUC par injection.

Disponible

Le système ne fonctionne pas manuellement ou automatiquement.

Le SRUC par injection peut être rendu disponible dans le réacteur en cas d'état de mise à l'arrêt spécifié et de refroidissement. Il doit toujours être possible de le ramener en service à l'intérieur d'une période prédéterminée qui dépend de l'état du réacteur, et qui est spécifiée dans votre manuel d'exploitation de centrale.

4.2.9 *Notions principales*

- Le rôle du SRUC par injection est de constituer une source froide pour le combustible en cas d'APRP afin de protéger les deux premières barrières contre le rejet de produits de fission.
- Un accident dû à la perte de réfrigérant primaire (APRP) est défini comme étant une fuite de D₂O hors du CC, entraînant une faible pression continue.
- Les paramètres de déclenchement du SAU en cas d'APRP grave est la puissance neutronique. Les paramètres de déclenchement du SAU en cas de petit APRP est la faible pression ou le faible niveau du pressuriseur.
- Des actions sur le système de confinement seront requises en cas d'APRP dans le confinement.
- Le principal paramètre d'initiation du SRUC par injection en cas d'APRP sera une faible pression dans le CC conjuguée à au moins un paramètre de conditionnement. Les paramètres de conditionnement de type courant sont les températures et pression élevée dans l'enceinte du réacteur, la pression élevée dans la salle de générateur de vapeur, le niveau du modérateur élevé, l'écoulement faible dans le CC et la faible pression continue dans le CC.
- La phase de purge du SRUC par injection est la phase qui permet au CC de se dépressuriser jusqu'à la pression d'injection du SRUC.
- La phase d'injection est la période pendant laquelle l'injection de l'eau stockée est effectuée.
- La phase de récupération est la période pendant laquelle l'eau récupérée après l'APRP est refroidie et réinjectée (par des pompes) dans le réacteur afin d'assurer le refroidissement du combustible à long terme.
- Le SRUC par injection amorce un refroidissement rapide afin d'évacuer la source de chaleur que constitue les générateurs de vapeur. Cela permet de réduire le taux de fuite hors du CC. Cela permet également de s'assurer que la pression diminue afin de permettre l'injection d'eau froide dans le CC pour refroidir le combustible.

- La circulation du caloporteur du CC est maintenue le plus longtemps possible afin de maximiser la circulation du caloporteur en vue de refroidir le combustible. Cela donne lieu à un taux de transfert plus élevé de la chaleur vers les générateurs de vapeur et permet de s'assurer qu'une dépressurisation jusqu'à la pression d'injection du SRUC se produira le plus rapidement possible. L'écoulement de caloporteur permet également de mélanger les phases liquide et vapeur afin d'éviter la formation de poches de vapeur, et de maintenir le combustible mouillé.
- Dans le cas des systèmes qui utilisent des accumulateurs de gaz, des vannes à action rapide s'ouvrent pour permettre au gaz pressurisé dans les accumulateurs de pressuriser l'eau retenue par les réservoirs de stockage de l'eau accumulée. Dans le cas des systèmes qui utilisent des pompes à eau haute pression, les vannes s'ouvrent pour permettre à l'eau contenue dans le réservoir de stockage du SRUC d'alimenter l'aspiration de ces pompes. Les pompes sont démarrées en vue de l'écoulement d'injection.
- Les vannes d'injection de H₂O et de D₂O du réacteur s'ouvrent (dans le réacteur touché seulement) afin de permettre d'amorcer l'écoulement d'injection.
- Dans certaines centrales, après l'injection haute pression initiale, de l'eau additionnelle est fournie par d'autres réservoirs de stockage. Les pompes de récupération déchargent cette eau dans le cœur du réacteur.
- Une fois que les injections sont terminées, la phase de récupération (refroidissement de l'eau après l'accident) débute. L'eau qui s'est déversée du réacteur a été recueillie dans le puisard de récupération. Les vannes d'isolement du puisard de récupération s'ouvrent et l'écoulement de récupération débute. L'eau sera prise dans le puisard de récupération, pompée vers les échangeurs de chaleur puis l'eau sera retournée au cœur du réacteur pour refroidir le combustible. Les échangeurs de chaleur de récupération évacueront la chaleur de désintégration du caloporteur.
- La fiabilité du SRUC est accrue par l'utilisation de :
 - composants redondants

- composants de qualité
- indépendance
- L'expression « à l'équilibre » désigne l'état où le SRUC par injection est prêt à fonctionner automatiquement, en cas d'APRP.
- Le terme « bloqué » est l'état où l'on empêche le système de fonctionner automatiquement tel qu'il a été conçu. Dans cet état, le système peut être ramené en service (c.-à-d. à l'équilibre) par une simple action de la salle de commande.
- Le SRUC par injection peut également être actionné manuellement dans les cas suivants :
 - lorsqu'un APRP se produit alors que le système est dépressurisé pour l'entretien (c.-à-d. lorsqu'il est bloqué)
 - lorsque les actions automatiques ne se produisent pas comme prévu (c.-à-d. lorsqu'il est à l'équilibre)
- Le terme « disponible » désigne un état où le système ne peut être activé manuellement ni automatiquement. Dans cet état, le système doit être en mesure d'être retourné en service à l'intérieur d'une limite de temps prédéterminée.
- Le CC doit fonctionner en dessous d'une certaine température (habituellement 90 °C) avant que le SRUC puisse être bloqué.
- Si le CC est dépressurisé avant que le SRUC par injection soit bloqué, le SRUC par injection fonctionne comme il a été conçu lorsque les paramètres de conditionnement sont respectés. Cela permet de faire baisser la teneur isotopique dans le CC, ce qui donnerait lieu à une pénalité économique grave.

4.3 Confinement

Le système de confinement protège le public, le personnel de centrale et l'équipement contre des conditions néfastes découlant d'une augmentation de la pression dans le bâtiment réacteur, habituellement par suite d'un APRP. Dans le présent module, nous allons examiner les différents types de systèmes de confinement, les types de structures de confinement, la fonction et le fonctionnement des composantes du confinement.

Le système de confinement est conçu de manière à contenir :

- a) l'énergie libérée sous forme de chaleur et de pression
- b) l'activité rejetée, p. ex. par le tritium et les produits de fission afin qu'ils demeurent à l'intérieur de certaines limites.

L'APRP, qui déclenche habituellement l'utilisation du système de confinement, peut avoir été causé par certains événements comme :

- a) défaillance mécanique du CC, par exemple, par suite d'un contrôle chimique inadéquat à long terme ou d'un transitoire de système
- b) APR (accident dû à la perte de régulation) où l'on n'a pas pu mettre à l'arrêt le réacteur suffisamment rapidement et où il y a eu rupture d'un tube de force
- c) perte d'alimentation de catégorie IV où l'on n'a pas pu mettre à l'arrêt le réacteur, et défaillance d'un tube de force.

Dans le cas des événements tels que b) et c), les deux systèmes d'arrêt doivent subir une défaillance (une telle combinaison de défaillances est hautement improbable). En raison du fait qu'il a été impossible de mettre à l'arrêt le réacteur, la quantité d'énergie libérée dans le confinement dans ces circonstances serait beaucoup plus importante qu'en cas d'APRP au cours duquel la puissance du réacteur est limitée par les systèmes d'arrêt.

Examinons les événements suivant un APRP dans le confinement à pleine puissance. Le D₂O du circuit caloporteur (CC) à pression et température élevées sera rejeté, et une partie passera à l'état vapeur. La température et la pression du bâtiment réacteur augmenteront. La pression sera au-dessus de la pression atmosphérique pendant quelques minutes, alors que la température pourrait atteindre jusqu'à 95 °C pendant plusieurs heures.

La structure du confinement doit fournir la source froide initiale dans ces conditions, jusqu'à ce qu'une autre source froide à long terme puisse être rendue disponible (p. ex. échangeur de chaleur du SRUC par injection) après que le SRUC par injection a mouillé de nouveau et refroidi le combustible.

La quantité de produits de fission rejetés dépendra de la rapidité avec laquelle on a mis fin à l'impulsion de puissance, à la manière dont le

combustible s'est comporté avant l'APRP et à la manière dont s'est comporté le SRUC par injection. Lorsque le SRUC par injection est entièrement fonctionnel et qu'il gère assez bien l'APRP, il est peu probable qu'une grande quantité de combustible soit défectueux, et la quantité des produits de fission rejetés sera faible. À noter que la fonction primaire du SRUC par injection est de maintenir le refroidissement du combustible, ce qui permettra d'éviter et de réduire au minimum les défaillances de combustible suite à un APRP. Cependant, un APRP peut causer des rejets de tritium dans le bâtiment réacteur de l'ordre du dixième de milliers de fois la concentration admissible maximale dans l'air (CAMA).

Si pour une raison ou pour une autre le SRUC par injection est incapable de gérer l'APRP, il est presque certain qu'il y aura une grande quantité de combustible défectueux ainsi que des rejets importants de produits de fission. Les champs de rayonnement à l'intérieur du confinement seront plus élevés que la normale.

Le confinement est essentiellement une enveloppe structurelle qui contient le réacteur et les composants haute pression du CC. À différents endroits, il y a une interface avec d'autres systèmes, c.-à-d. les générateurs de vapeur. L'interface dépend de la quantité d'équipement se trouvant à l'intérieur du confinement.

Dans les premiers réacteurs CANDU et dans les réacteurs de 600 MW, tous les générateurs de vapeur et les pompes de circulation du CC sont entièrement situés à l'intérieur du confinement. Cela augmente naturellement la taille du bâtiment réacteur requise pour loger ces composantes.

Dans le cas des réacteurs CANDU plus anciens, une structure de confinement plus grande est requise, car le volume des enceintes de réacteur est plus grand.

Dans les nouvelles centrales, on a décidé, après une étude détaillée sur la sûreté, de relocaliser les différents équipements afin de réduire la taille du confinement. Par exemple, seules les bases des pompes principales du CC et des générateurs de vapeur se situent à l'intérieur du confinement. La figure 4.3 illustre le prolongement du CC au-delà de la limite de confinement.

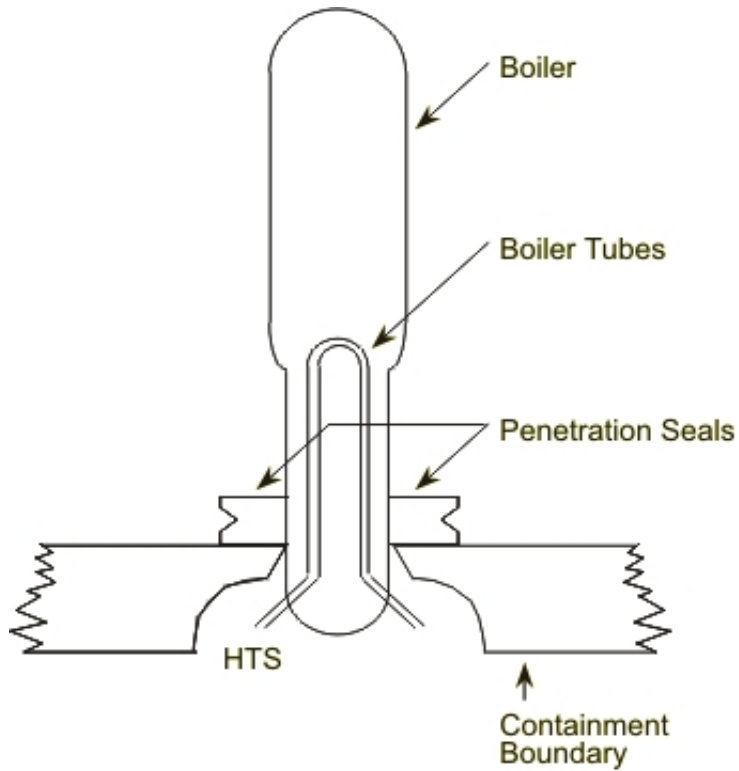


Figure 4.3 – Configuration des générateurs de vapeur de type courant

Boiler	Générateur de vapeur
Boiler Tubes	Tubes du générateur de vapeur
Penetration Seals	Joints de pénétration
HTS	CC
Containment Boundary	Limite du confinement

La structure de confinement plus grande dans les anciennes centrales possède des zones accessibles. Selon les dangers prévus, ces zones peuvent être ou non à accès contrôlé. Cette caractéristique n'existe pas dans les centrales plus récentes.

L'efficacité du confinement est déterminée par le taux de fuite hors de la structure en cas d'accident. Le principe de base est, par conséquent, d'éliminer ou de réduire au minimum les fuites et, s'il y a une fuite, elle doit être contrôlée et surveillée. C'est une raison pour laquelle le confinement est maintenu à une pression subatmosphérique. Toute fuite se fait vers l'intérieur. Un écoulement de sortie est maintenu afin d'assurer que la pression est subatmosphérique. Cette sortie est filtrée et surveillée.

À noter que toutes les composantes qui pénètrent dans le confinement (conduite, câbles, sas, chambres de transfert, etc.) possèdent des joints afin d'éviter la fuite. Des essais de pression périodique sont également effectués afin de vérifier l'intégrité du confinement.

Des fuites vers l'extérieur se produiront seulement si la pression de confinement est supérieure à la pression atmosphérique. Si la pression dépasse les limites de conception, des dommages pourraient être causés à la structure du confinement.

4.3.1 TYPES DE CONFINEMENT

Il existe actuellement deux types de systèmes de confinement dans les réacteurs CANDU :

1. Confinement à suppression de pression – utilisé dans les centrales CANDU 600 MW à un seul réacteur.
2. Confinement à pression négatif – utilisé dans toutes les centrales à plusieurs réacteurs d'Ontario Hydro.

L'efficacité de ces deux types de confinement dépend de la disponibilité du SRUC par injection à l'équilibre pour limiter l'entrée d'énergie à long terme en cas d'APRP.

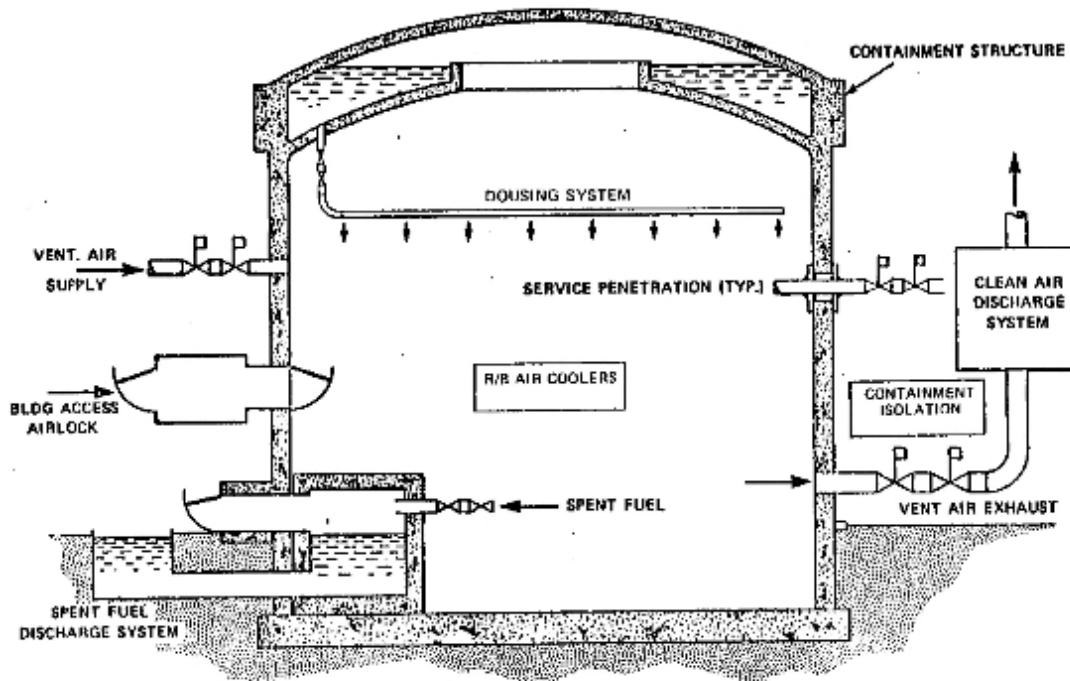


Figure 4.4 – Système de confinement à suppression de pression de type courant

Containment Structure	Structure du confinement
Dousing system	Dispositif d'aspersion
Vent. Air Supply	Soufflage de l'air de ventilation
Service Penetration (TYP)	Entrée de service (courant)
Bldg Access Airlock	Sas pour l'accès au bâtiment
R/B Air Coolers	Refroidisseurs d'air R/B
Clean Air Discharge System	Système de décharge d'air pur
Containment Isolation	Isolement du confinement
Spent Fuel	Combustible épuisé
Vent Air Exhaust	Extraction de l'air de ventilation
Spent Fuel Discharge System	Système de décharge du combustible épuisé

4.3.2 Confinement à suppression de pression (CSP)

Un schéma général des systèmes à suppression de pression est illustré à la figure 4.4.

Le confinement consiste en une structure en béton précontraint à plafond voûté, doté d'un système d'aspersion, de sas et d'un système

de fermeture. Les parois en béton ont une épaisseur de plus d'un (1) mètre.

Toutes les surfaces internes de la structure de confinement comprennent : dôme supérieur, parois extérieurs, dalle, surface extérieur de la travée de décharge de combustible épuisé et de sas, formant habituellement la limite du confinement. Lors du transfert du combustible, la limite s'étend aux surfaces de la travée de stockage du combustible irradié.

Pendant le fonctionnement normal, la pression à l'intérieur du confinement est maintenue légèrement en dessous de la pression atmosphérique par un système de ventilation.

Lorsque pour une raison ou pour une autre la pression à l'intérieur du confinement augmente au-dessus de la pression atmosphérique, particulièrement durant un APRP, les fuites du confinement doivent être limitées. Le rejet de tritium et de produits de fission dans l'environnement est maintenu au niveau le plus bas possible afin de ne pas dépasser le taux de fuite spécifié. Pour tout APRP, la surpression ne doit pas dépasser ~120 kPa (manométrique).

Un réservoir d'aspersion se trouve dans le dôme du bâtiment du confinement. Il retient l'eau ordinaire à la fois pour l'aspersion (~2000 m³) et pour l'injection d'urgence de caloporteur à pression moyenne (~500 m³). L'aspersion se fait par l'ouverture des vannes d'aspersion. Une fois que les vannes sont ouvertes, l'eau s'écoule par gravité en provenance du réservoir de stockage vers les collecteurs d'aspersion. (Ces vannes sont associées à des canaux et il doit y avoir un nombre minimum pour amorcer l'aspersion). L'aspersion condense la vapeur rejetée et, par conséquent, permet :

1. D'absorber l'énergie thermique contenue dans la vapeur
2. De réduire l'ampleur et la durée de l'impulsion de surpression du confinement
3. De dissoudre les produits de fission solubles (p. ex. I¹³¹), et d'entraîner les produits de fission insolubles, ce qui permet de réduire au minimum l'étendue de la contamination dans l'air.

Les produits de fission qui sont des gaz rares, comme le krypton 88, ne seront pas touchés par l'aspersion.

La structure du confinement est habituellement refroidie et déshumidifiée par les refroidisseurs de l'enceinte. Cela est nécessaire en raison de la présence de sources de chaleur (conduite du CC, générateurs de vapeur, etc.) et d'humidité (petites fuites de D₂O, de H₂O) à l'intérieur du confinement.

Étanchéité du CSP

Lors d'un APRP, la structure du confinement peut être isolée de l'environnement en fermant les points d'isolement. Les points d'isolement sont des joints aux entrées d'aération et des vannes aux raccordements de conduite. On doit assurer l'étanchéité du confinement afin d'éviter que les fuites dépassent les niveaux admissibles (tel que discuté dans la section précédente).

L'assurance de l'étanchéité du confinement est habituellement amorcée dans les cas suivants :

- Niveau de radioactivité élevé à l'intérieur du confinement
- Pression élevée à l'intérieur du confinement
- Radioactivité élevée à la sortie et dans les cheminées ou perte de surveillance des cheminées.

4.3.3 Fonctionnement du CSP durant un petit APRP

Dans le cas d'un petit APRP, le rejet d'énergie sera plus faible mais pourrait se produire sur une plus longue période. La pression à l'intérieur du confinement augmentera lentement et on devra assurer l'étanchéité pour un ou plusieurs paramètres de déclenchement. Les refroidisseurs d'enceinte peuvent condenser la vapeur résultante (et limiter la pression du confinement) de manière à ce que la pression qui déclencherait l'aspersion ne soit pas atteinte.

Si la pression continue d'augmenter jusqu'à la valeur seuil d'aspersion (~14 kPa (manométrique)), il pourrait y avoir une action d'aspersion intermittente à mesure que les vannes d'aspersion s'ouvriront et se fermeront aux valeurs seuils étagées.

Dans ces conditions, après la période initiale d'aspersion, qui cesse lorsque la pression diminue en deçà de la valeur seuil d'aspersion OFF (~7 kPa (manométrique)), la pression augmentera probablement encore et d'autres cycles d'aspersion seront requis jusqu'à ce que la pression demeure sous la valeur seuil OFF. À mesure que l'entrée d'énergie imputable à l'APRP diminue (en raison de la

dépressurisation du CC), la condensation sur les parois et les refroidisseurs d'enceinte devient un facteur crucial pour maintenir la pression à l'intérieur du confinement à un faible niveau.

4.3.4 Fonctionnement du CSP durant un APRP grave

Lors d'un APRP grave, la pression et la température à l'intérieur du confinement augmentent rapidement. L'étanchéité du confinement (et l'arrêt du réacteur) se produisent à une pression de confinement d'environ 3,5 kPa (manométrique) et l'aspersion commence à une surpression d'environ 14 kPa (manométrique).

En cas d'APRP grave, une période d'aspersion continue réduira rapidement la pression à l'intérieur du confinement jusqu'à la pression atmosphérique. Le système de refroidissement de l'enceinte et les périodes d'aspersion permettront de réduire davantage la pression à l'intérieur du confinement, suivant les besoins. Une fois que la pression est ramenée à une pression proche de la pression atmosphérique, on peut procéder au nettoyage de l'atmosphère du confinement.

4.3.5 Notions principales

- Il existe deux types de confinement : ce sont le confinement à suppression de pression et le confinement à pression négative. Un système à l'équilibre commun à ces deux systèmes est le SRUC par injection.
- La pression du CSP est habituellement maintenue de manière à être inférieure à la pression atmosphérique par le système d'aération.
- Le système d'aspersion limite la pression du confinement en condensant la vapeur rejetée suite à un APRP. En outre, les produits de fission solubles et insolubles seront dissous/entraînés dans l'eau.
- L'aspersion, pour un système à CSP, sera amorcée lorsque la pression est élevée dans l'enceinte et s'effectuera par l'ouverture des vannes d'aspersion, qui se trouvent dans les conduites de distribution en dessous du réservoir d'aspersion.
- L'étanchéité du confinement signifie que l'on doit isoler la structure du confinement de l'environnement. Les entrées de ventilation et les conduites seront fermées afin d'éviter toute fuite dépassant les niveaux admissibles.

- Suite à un APRP grave, dans le cas d'un CSP, la pression du confinement commence à augmenter rapidement. L'étanchéité du confinement est initiée pour un ou plusieurs paramètres de déclenchement. Les vannes d'aspersion s'ouvriront pour amorcer l'aspersion afin de contrer l'augmentation importante de la pression. À mesure que la pression diminue à l'intérieur du confinement, l'aspersion cesse puis recommence selon les besoins afin de maintenir la pression à un faible niveau.
- Suite à un petit APRP, dans le cas d'un CSP, la pression à l'intérieur du confinement commence à augmenter lentement. L'étanchéité du confinement débute pour un ou plusieurs paramètres de déclenchement. Les refroidisseurs d'enceinte condensent la vapeur et refroidissent l'atmosphère de l'enceinte. Cela peut limiter l'augmentation de pression à l'intérieur du confinement au point où aucune aspersion ne sera plus requise. Si la pression du confinement continue d'augmenter, l'aspersion fonctionne puis s'arrête de manière intermittente afin de maintenir la pression du confinement à un faible niveau.
- Les refroidisseurs d'enceinte refroidissent et déshumidifient l'atmosphère du confinement.
- L'eau contenue dans le réservoir d'aspersion sert à la fois à l'aspersion et à l'injection du SRUC.

4.3.6 Confinement à pression négative

Ce type de confinement est utilisé dans les centrales CANDU à plusieurs réacteurs, avec quelques variantes d'un site à l'autre.

Le système est caractérisé par un bâtiment sous vide qui, comme son nom l'indique, est habituellement maintenu à une pression de beaucoup inférieure à la pression atmosphérique, habituellement entre 7 et 14 kPa (absolue). Les réacteurs eux-mêmes sont logés dans des bâtiments en béton armé distinct. Les deux structures sont reliées par une conduite de décharge, qui permet à tout mélange vapeur/air en cas d'APRP de se rendre au bâtiment sous vide. Le bâtiment sous vide (voir figure 13.4) est habituellement isolé de la conduite de décharge (plus particulièrement, les vannes de décharge) par un certain nombre de vannes de décharge.

Le bâtiment réacteur (et la conduite de décharge) sont habituellement maintenus à une pression légèrement subatmosphérique afin de réduire au minimum les fuites hors du réacteur d'air potentiellement

contaminé durant le fonctionnement normal du réacteur (par des assécheurs de purge, ou des systèmes d'aération, selon la centrale).

Dans les centrales plus anciennes, le confinement est plus grand qu'ailleurs. Cela signifie que le bâtiment sous vide doit avoir un volume plus grand.

Le bâtiment sous vide est une notion unique aux centrales CANDU à plusieurs réacteurs et leur confère un avantage économique par rapport aux systèmes individuels.

L'un des inconvénients des systèmes de CPN (confinement à pression négative) est que suite à un APRP dans un réacteur, le bâtiment sous vide devient non disponible pour les autres réacteurs et la mise à l'arrêt de ces autres réacteurs non touchés est requise. À noter également que le SRUC par injection n'est plus disponible pour l'injection vers les autres réacteurs, étant donné qu'une mise à l'arrêt serait requise de toute façon.

Suite à un APRP, l'augmentation consécutive de pression dans la conduite de décharge fera ouvrir les vannes de décharge. L'air et la vapeur/les contaminants produits par l'APRP sont alors évacués de l'enceinte du réacteur vers le bâtiment sous vide. Cela signifie que le réacteur touché est purgé de son atmosphère contaminée en un temps relativement court (30 à 60 secondes). La pression du confinement dans le réacteur touché peut être ramenée à la pression subatmosphérique une fois de plus. Cela permet de réduire au minimum à la fois la contamination de l'équipement dans le bâtiment réacteur et tout rejet incontrôlé.

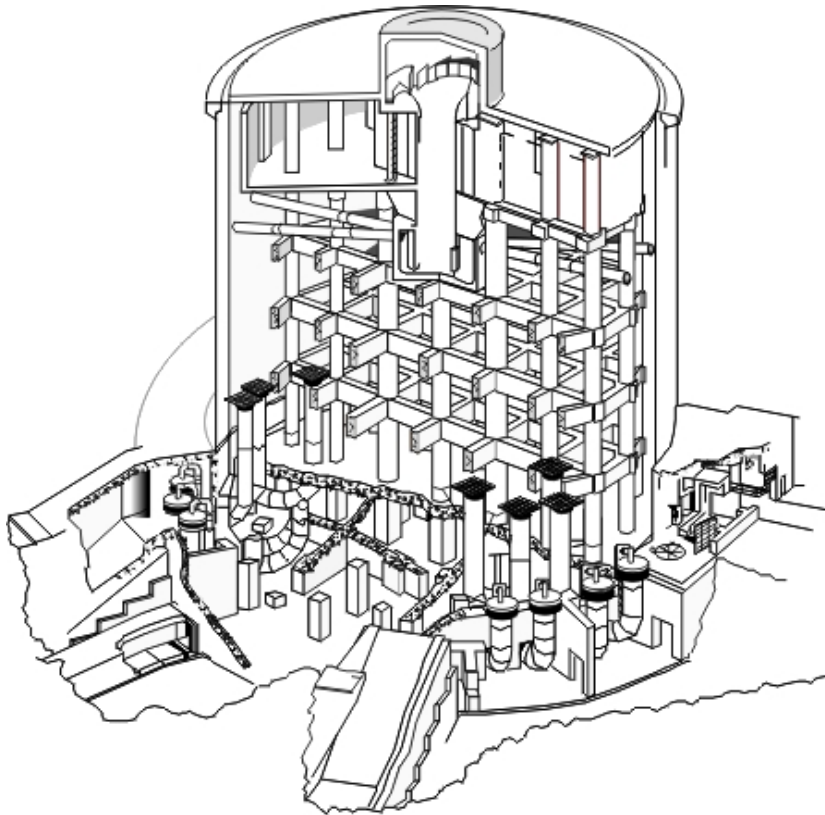


Figure 4.5 : Bâtiment sous vide de type courant

Il convient de noter également que l'exigence relative à l'évacuation du mélange vapeur/air hors de l'enceinte du réacteur fait en sorte que le passage vers le bâtiment sous vide doit être libre. C'est pourquoi les machines de chargement de combustible ne doivent pas être rangées côte à côte dans la conduite des machines de chargement de combustible (une partie du trajet de décharge vers le bâtiment sous vide). Le rangement inadéquat des machines de chargement de combustible lors d'un APRP pourrait restreindre le mouvement vapeur/air, ce qui permettrait à la pression près des machines de chargement de combustible lors d'un APRP de s'accumuler. Cela pourrait endommager l'enceinte du réacteur en raison de la surpressurisation.

La structure du confinement aura un taux de fuite plus élevé pendant la courte surpression qui se produit lors d'un APRP. Cependant, ce phénomène est à court terme. Cela s'explique par le fait que le CPN a un taux de fuite plus élevé à court terme, alors que le CSP a un taux de fuite plus faible, mais qui dure plus longtemps.

Bâtiment sous vide

Le bâtiment sous vide réduit considérablement les risques de fuite hors de la zone de confinement, en limitant la surpression du confinement lors d'un APRP. Sans ce bâtiment, même un transitoire de surpression de courte durée (30 à 60 secondes) dans la zone du confinement suite à un APRP pourrait donner lieu à une fuite inacceptable dans l'environnement.

Le bâtiment est une structure en béton armé de volume suffisant pour accommoder tout l'air et toute la vapeur soutirés du bâtiment réacteur et des conduites de décharge en cas d'accident.

À noter que la partie supérieure du bâtiment sous vide contient un réservoir de stockage d'eau d'urgence (voir figure 4.6) qui contient de l'eau à la fois pour l'aspersion et pour le SRUC par injection (dans certaines centrales). Cette eau constitue également l'isolement sous vide nécessaire entre les parties supérieures et principales en plus de l'eau du collecteur d'aspersion.

Le bâtiment sous vide comprend deux chambres :

a) Chambre sous vide supérieure

Cette chambre est isolée par une couverture d'eau et est maintenue à une faible pression subatmosphérique, habituellement ~ 7 kPa (absolu), à l'aide de pompes à vide situées dans le sous-sol du bâtiment sous vide. Son rôle principal est de fournir une ΔP dans le but d'amorcer automatiquement l'action d'aspersion suite à APRP.

b) Chambre principale

Le volume de cette chambre est beaucoup plus grand que celui de la chambre supérieure (environ 60 à 70 fois plus grand) et la chambre est également maintenue à une pression ~ 7 kPa (absolue). Cette pression est assurée par des pompes à vide, semblables à celles utilisées pour la chambre supérieure, qui se trouve dans le sous-sol du bâtiment sous vide. L'isolement de la chambre supérieure se fait par une couverture d'eau, et l'isolement par rapport à la structure de confinement se fait par des vannes de décharge.

La chambre sous vide principale peut accommoder un mélange vapeur-air suite à un APRP (ou à la fuite d'une conduite de vapeur dans le confinement). C'est dans cette

chambre que l'aspersion se produit. À noter que dans le cas du système CSP, l'aspersion condense la vapeur, limite l'augmentation de pression dans le bâtiment sous vide et dissout et entraîne les produits de fission (à l'exception des gaz rares).

Vannes de décharge

Les vannes de décharge constituent l'isolement entre la conduite de décharge et le bâtiment sous vide. Elles sont conçues pour s'ouvrir automatiquement lorsque la pression dans la conduite de décharge augmente jusqu'à une valeur juste au-dessus de la pression atmosphérique (habituellement ~3,5 à 7 kPa (manométrique)).

On dénombre habituellement 12 à 20 de ces vannes selon la centrale. La majorité d'entre elles sont des vannes de décharge (VD), et trois ou quatre d'entre elles, selon la centrale, sont des vannes de décharge avec instruments (VDI). À mesure que la pression augmente dans le collecteur de la vanne de décharge (directement raccordée à la conduite de décharge) jusqu'à la valeur seuil requise, la pression agit directement sur les VD et sur les VDI, ce qui fait ouvrir les vannes. Cela permet également au mélange air-vapeur haute pression de pénétrer dans le bâtiment sous vide en provenance du confinement.

Lorsque la pression diminue (habituellement à +3,5 kPa (manométrique)), toutes les VD se ferment alors que les VDI demeurent ouvertes jusqu'à ce que la pression descende à un niveau subatmosphérique (-2 kPa (manométrique)). Les VDI s'ouvrent ou se ferment selon que la pression varie dans une plage de -1 kPa (manométrique) à -2 kPa (manométrique).

Les VDI peuvent être contrôlées manuellement parce que le dessus de la vanne peut être assujéti au vide à cause du bâtiment sous vide, ce qui fait ouvrir les vannes.

Dans certaines centrales, en plus des VD et des VDI, il y a des VDA (vannes de décharge auxiliaires) qui sont de plus petite taille et qui peuvent supporter des pressions générées par un petit APRP. Leurs valeurs seuil de fonctionnement sont plus faibles que celles des grandes VD. Habituellement, elles s'ouvrent à +1,5 kPa (manométrique) et se referment lorsque la pression diminue à environ -6,5 kPa (manométrique). Ensuite, la pression variera entre la valeur de vanne fermée et -3,5 kPa (manométrique) et elles seront ouvertes de nouveau.

À noter que dans le cas des APRP graves, toutes les VD, VDI et VDA seront ouvertes.

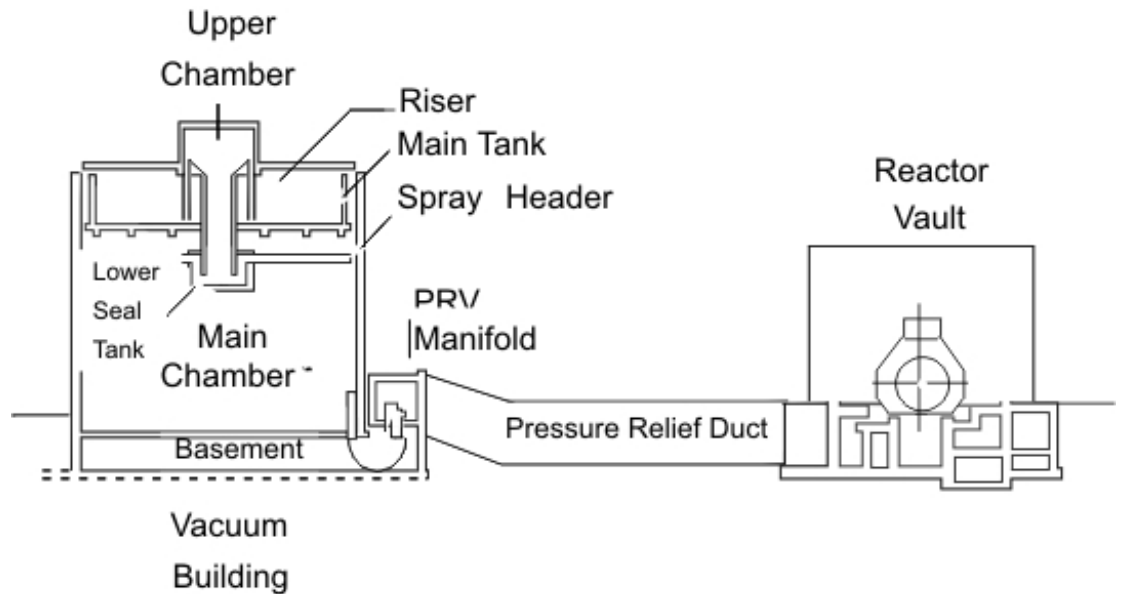


Figure 4.6
Système de confinement à pression négative de type courant

Upper Chamber	Chambre supérieure
Riser	Colonne montante
Main Tank	Réservoir principal
Spray Header	Collecteur d'aspersion
PRV Manifold	Collecteur de la VD
Main Chamber	Chambre principale
Lower Seal Tank	Réservoir inférieur
Basement	Sous-sol
Vacuum Building	Bâtiment sous vide
Pressure Relief Duct	Conduite de décharge
Reactor Vault	Enceinte du réacteur

Conduite sous vide

La conduite sous vide est le passage de la VD à la chambre principale sous vide, permettant au mélange air-vapeur suite à un APRP de pénétrer dans le bâtiment sous vide. À la figure 4.6, on peut observer leur forme et la raison pour laquelle on les appelle également tubes en J.

Leur forme s'explique également parce qu'elle joue le rôle d'isolant pour les VD en provenance du bâtiment sous vide en remplissant d'eau

la conduite sous vide. Le remplissage de la conduite forme une couverture d'eau entre le confinement et le bâtiment sous vide, ce qui permet l'entretien/l'ouverture manuelle de la vanne.

À noter que l'ouverture de la conduite est bien au-dessus, ou s'étend bien au-dessus du plancher de la chambre principale. Cela permet d'éviter que l'eau sur le plancher (après l'aspersion) inonde les tubes et forme une couverture d'eau. L'inondation de ces tubes rendrait le bâtiment sous vide non disponible pour maintenir la pression subatmosphérique dans le confinement.

Étanchéité du CPN

La méthode d'étanchéité du confinement est semblable à celle mentionnée précédemment pour les systèmes CSP, c.-à-d. que les joints et les vannes se ferment à l'entrée. Mais dans le cas d'un système CPN, cela ferme également automatiquement toutes les pompes à vide à la fois dans la chambre supérieure et dans la chambre principale afin d'éviter la décharge d'air contaminé.

Refroidissement de l'enceinte

Comme dans le cas d'un système CSP, la structure du confinement est refroidie et déshumidifiée par les refroidisseurs de l'enceinte. Cela est nécessaire à cause des surchauffes de chaleur (conduite du CC, générateurs de vapeur, etc.) et de l'humidité (petites fuites de D₂O, de H₂O) à l'intérieur du confinement. Ce système maintient habituellement le confinement à une température entre 35 et 40 °C.

4.3.7 Notions principales

- Les pompes à vide maintiennent la pression dans la chambre supérieure et la chambre principale à un très faible niveau. Cela permet de conserver l'efficacité du bâtiment sous vide comme puits d'énergie suite à un APRP.
- La chambre principale constitue une zone vers laquelle l'atmosphère de l'enceinte du réacteur est soutirée suite à un APRP. La vapeur y sera condensée par des mesures d'aspersion à mesure que la pression augmente.
- La chambre supérieure maintient une ΔP qui permet une augmentation de la pression dans la chambre principale afin de déclencher automatiquement l'aspersion.
- Les VD isolent la conduite de décharge de la chambre sous vide principale du bâtiment sous vide. Ces vannes s'ouvrent

automatiquement afin de contrôler les augmentations de pression dans le confinement suite à un APRP. Les VD de petite et grande taille sont actionnées en cas d'APRP grave, en laissant entrer une grande quantité du mélange air/vapeur dans le bâtiment sous vide. Après la réduction de pression, les petites VD sont modulées afin de maintenir la pression à l'intérieur du confinement en-deçà de la pression atmosphérique à long terme. Les VD instrumentées peuvent être mises en marche à partir de la salle de commande. Il suffit, pour se faire, d'appliquer un vide au-dessus de la vanne (dans le bâtiment sous vide).

- La conduite sous vide raccorde la conduite de décharge à la chambre sous vide (isolée par les VD). Cette conduite permet de procéder à l'entretien des VD, lorsque la conduite est remplie d'eau, en servant de couverture d'eau.
- La conduite de décharge raccorde les structures du confinement du réacteur (enceinte) au collecteur de décharge de pression.
- La chambre supérieure est isolée afin de maintenir une ΔP entre la chambre inférieure au moyen d'une couverture d'eau. Le vide est assuré par les pompes à vide, qui évacuent toute entrée d'air.
- Les VD fonctionnent lorsque la pression du confinement dépasse une limite prévue dans la conception. Une pression accrue agissant directement sur la vanne fera en sorte que celle-ci s'ouvrira.
- L'étanchéité du confinement sera assurée en cas de pression élevée, ou en présence de radioactivité élevée dans le confinement, ou encore en cas de radioactivité élevée ou de mise hors service des cheminées. Cette mesure permet de fermer tous les points de fuite potentiels hors de la structure du confinement en fermant les vannes, les registres, etc.
- Les refroidisseurs d'enceinte permettent habituellement de refroidir et de déshumidifier le confinement.

4.3.8 Fonctionnement du CPN en cas d'APRP grave

Un APRP grave génère de grands volumes de vapeur à température élevée (~100 °C) à mesure que le caloporteur du CC s'échappe par la brèche. La pression et la température à l'intérieur du confinement

augmentent rapidement et déclenchent la mise en marche de l'étanchéité du confinement.

À mesure que la pression dans la conduite de décharge augmente jusqu'à atteindre la pression nominale des VD (les VDA d'abord, lorsqu'elles sont installées, puis les VDI et les VD principales), s'ouvriront et le mélange air/vapeur à haute pression et à température élevée sera aspiré vers le bâtiment sous vide par les conduites sous vide.

L'augmentation de la pression dans le bâtiment sous vide agit sur l'eau dans le réservoir de stockage d'urgence et l'eau est forcée dans la chambre sous vide supérieure. À noter qu'une couverture d'eau permet d'éviter que l'atmosphère dans la chambre principale ne pénètre dans la chambre supérieure (par le collecteur de sortie) à mesure que la pression dans la chambre principale augmente. Le remplissage de la chambre supérieure par de l'eau permet à l'écoulement de rejoindre la sortie et les collecteurs d'aspersion, ce qui déclenche l'aspersion dans la chambre principale. L'aspersion de H₂O froid dans le mélange vapeur/air (dans la chambre principale) condensera la vapeur. Cela réduira la pression à mesure que le volume de vapeur diminue.

À noter que, dans la plupart des centrales, la conception de la chambre supérieure (telle qu'illustrée à la figure 13.4) permet d'éviter la formation d'un siphon, en empêchant l'air dans la chambre supérieure d'être transporté vers le collecteur de sortie. Si l'air dans la chambre supérieure est perdu, un siphon se formera. S'il y a formation d'un siphon pendant l'aspersion, il ne s'arrêtera pas jusqu'à ce que le réservoir soit vide.

Par suite de la diminution de pression pendant l'aspersion, les VD se fermeront. Les VD se fermeront en premier lieu, suivis des VDA et des VDI. La pression à l'intérieur du confinement sera alors maintenue subatmosphérique par les VDI ou les VDA et par les refroidisseurs d'enceinte, tel que mentionné précédemment. Un transitoire de pression de type courant pour un APRP grave est illustré à la figure 4.7.

À long terme, pour maintenir la pression subatmosphérique à l'intérieur du confinement, le système de décharge d'air filtré (DAF) est amorcé par l'opérateur.

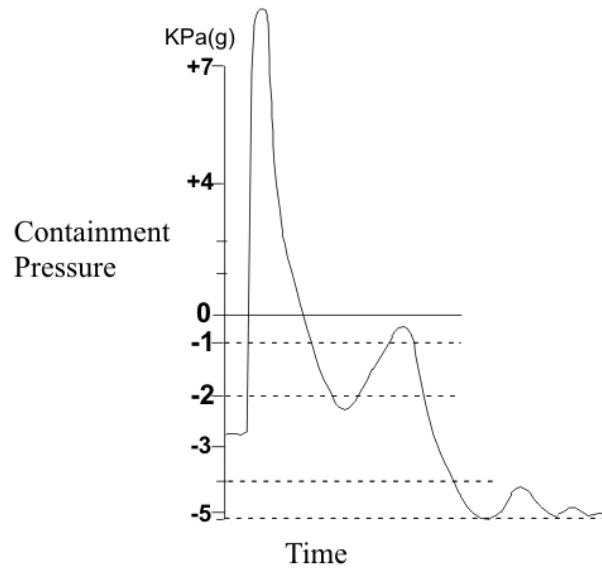


Figure 4.7
Transitoire de pression de type courant suite à un APRP

kPa(g)	kPa (manométrique)
Containment Pressure	Pression à l'intérieur du confinement
Time	Temps

4.3.9 Fonctionnement du CPN durant un petit APRP

Dans ce cas, l'augmentation de pression à l'intérieur du confinement sera plus faible, et il est probable que la pression d'ouverture des grandes VD ne soit pas atteinte.

Dans ce genre de situations, ce sont les VDI ou les VDA qui gèrent la surpression dans le confinement, selon la centrale. Lorsque la pression à l'intérieur du confinement est réduite, les VDA se ferment, mais modulent pour maintenir la pression du confinement négative. Si l'APRP est suffisamment petit, la pression d'ouverture des vannes de décharge ne sera pas atteinte et l'augmentation de pression ainsi que le retour aux conditions subatmosphériques seront gérés par les refroidisseurs d'enceinte (en autant que suffisamment de vapeur soit condensée).

L'aspersion durant un petit APRP dépend de l'accroissement de pression dans le bâtiment sous vide et, en cas d'aspersion, il connaît des cycles suivant la modulation des VDI ou des VDA.

4.3.10 Sas

Les sas sont des ouvertures dans la limite de confinement qui permettent au personnel et à l'équipement d'y entrer, sans créer de brèche dans la limite du confinement. Il s'agit d'un ensemble double de portes. En ouvrant une seule porte à la fois, la limite de confinement ne subit aucune brèche. Chacune des portes du sas est scellée à l'aide d'un joint gonflable. Des procédures de fonctionnement et des dispositifs de verrouillage intégrés sont utilisés pour s'assurer que la limite de confinement n'est pas compromise lorsque les sas sont utilisés.

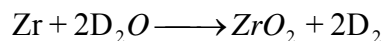
Pour faire entrer des pièces d'équipement de plus grande taille, on dispose d'ouvertures plus grandes appelées chambres de transfert. Elles sont semblables aux sas, mais sont construites en béton plutôt qu'en acier. Elles fonctionnent de la même façon que les sas, et un très petit nombre d'entre elles sont scellées par des boulons.

4.3.11 Système de décharge d'air filtré

Après un APRP, le confinement se repressurise graduellement en raison de l'entrée d'air (petits trous dans les joints de confinement, fuite du système d'éventage, etc.). La décharge d'air filtré est amorcée afin de maintenir le confinement ou le bâtiment sous vide en dessous de la pression subatmosphérique. L'air du confinement est évacué par les DAF (décharge d'air filtré) plutôt que par les filtres normaux (par le système d'évacuation de l'air contaminé). La DAF comporte des déshumidificateurs (qui éliminent les gouttelettes d'eau entraînées), des filtres HEPA robustes qui permettent d'éliminer les matières particulaires et des absorbeurs de charbon qui éliminent l'iode radioactif. Une fois que la décharge d'air est établie dans la DAF, l'atmosphère du confinement peut être maintenue subatmosphérique (à noter que ces DAF ne sont pas efficaces à 100 % et qu'il peut y avoir des rejets de petites quantités de matières particulaires et d'iode radioactif, de tritium et de gaz rare radioactif).

4.3.12 Allumeurs d'hydrogène

En cas d'APRP accompagné d'une défaillance du SRUC, la température de la gaine du combustible monte. Si la température du combustible dépasse ~1100 °C, l'oxydation vapeur/zirconium entraîne la formation de D₂/H₂ selon la réaction suivante :



Afin d'éviter que les concentrations de D_2/H_2 et de O_2 augmentent, et que les gaz s'allument à l'intérieur du confinement, on utilise un système d'allumage de l'hydrogène.

Le principe de ce système est que l'on allume délibérément le mélange de D_2/H_2 et de O_2 en faible concentration dans un milieu de vapeur. L'allumage du D_2/H_2 à faible concentration permet d'éviter des transitoires de pression/de température graves qui pourraient endommager l'enveloppe du confinement (ce qui se produit lorsque les concentrations de D_2/H_2 sont élevées et s'accumulent jusqu'au niveau explosif et s'allument).

Les allumeurs d'hydrogène sont des serpentins de réchauffage, semblables aux serpentins des fours, qui chauffent jusqu'à ≥ 750 °C et allument le D_2/H_2 . Dans les réacteurs des centrales de Bruce et de Darlington, ces allumeurs se trouvent à différents niveaux à l'intérieur de l'enceinte du réacteur et dans les réacteurs de Pickering ils se trouvent dans l'enceinte des machines de chargement de combustible et dans les salles d'entretien.

4.3.13 Notions principales

- L'aspersion se produit lorsque la pression accrue à l'intérieur de la chambre principale du bâtiment sous vide force l'entrée d'eau dans la chambre supérieure, ce qui cause un déversement dans les collecteurs d'aspersion.
- Suite à un APRP grave, dans le cas d'un système CPN, la pression du confinement commence à augmenter rapidement. L'étanchéité du confinement est initiée avec un ou plusieurs paramètres de déclenchement. Toutes les VD (les VDA suivies des VD principales et des VDI) s'ouvrent pour contrer l'augmentation de pression. La pression dans la chambre principale du bâtiment sous vide augmente. Cela entraîne une aspersion visant à réduire la pression dans la chambre principale. À mesure que la pression à l'intérieur du confinement diminue, les grandes VD se ferment, suivies des VDI et des VDA. Les VDI ou les VDA, selon la centrale, modulent pour maintenir la pression subatmosphérique.
- Suite à un petit APRP, dans le cas d'un système CPN, la pression à l'intérieur du confinement commence lentement à augmenter. L'étanchéité du confinement est initiée avec un ou plusieurs paramètres de déclenchement. Les refroidisseurs d'enceinte condensent la vapeur et refroidissent l'atmosphère de

l'enceinte. Cela peut limiter l'augmentation de pression dans le confinement au point où on n'a plus besoin d'utiliser les VD. Si la pression à l'intérieur du confinement continue d'augmenter, les VDA ou les VDI s'ouvriront pour réduire la pression à l'intérieur du confinement.

- Une fois que la pression à l'intérieur du confinement est réduite, les VDA se ferment, mais modulent pour maintenir la pression à l'intérieur du confinement en dessous de la pression atmosphérique.
- Les sas permettent au personnel et à l'équipement d'entrer dans le confinement sans l'ouvrir à la pression atmosphérique.
- Le système de décharge d'air filtré (DAF) permet à l'air contaminé à l'intérieur de la structure de confinement ou de la structure sous vide d'être déchargé à l'atmosphère (à un taux contrôlé) après avoir été filtré pour éliminer les contaminants. Cela permet de maintenir la pression subatmosphérique à l'intérieur du confinement.
- Le système d'allumage d'hydrogène allume les faibles concentrations de D_2/H_2 formées durant un APRP, ce qui permet d'éviter que des dommages graves soient causés au confinement.

4.3.14 Atmosphère de l'enceinte

Assécheurs de purge

Les rôles du système de récupération de vapeur sont les suivants :

- a. collecte et récupération de vapeur de D_2O présente dans le confinement par suite d'une fuite de caloporteur du CC normale
- b. enlèvement du tritium en suspension dans l'air à l'intérieur du confinement
- c. maintien de la pression du confinement légèrement subatmosphérique.

Le point c) est notre principale préoccupation. Après l'étape de récupération de vapeur dans le système de récupération de vapeur, l'air est soit retourné au confinement ou déchargé à l'atmosphère par les assécheurs de purge et les cheminées de centrales où il est filtré et

surveillé par le système de sortie de l'air contaminé. Cet écoulement d'air par les assécheurs de purge permet habituellement de maintenir la pression subatmosphérique dans le confinement (c.-à-d. que cela évacue l'air qui s'est échappé dans le confinement).

Dans le cas d'un CSP et dans les centrales plus anciennes, un système de purge semblable à celui mentionné précédemment permet de maintenir les zones de D₂O du confinement à une pression légèrement négative, par rapport aux autres zones accessibles.

Disponibilité

Le confinement et tous les sous-systèmes s'y rapportant (bâtiment sous vide, inventaire de l'eau d'aspersion, etc.) doivent être disponibles pour tous les états de centrale sauf lorsque le réacteur est à l'état d'arrêt garanti afin de préserver la quatrième barrière contre des rejets radioactifs dans l'environnement.

Le système de confinement est considéré disponible lorsqu'il est capable de limiter les doses au public de manière à ne pas dépasser les limites réglementaires.

Pour réduire au minimum la non-disponibilité du confinement, on doit prendre les mesures suivantes :

- le système de confinement ne doit pas être mis hors service intentionnellement à moins que le circuit CC soit à une température de 90 °C ou moins et que le réacteur soit à l'état d'arrêt garanti.
- Au moins une porte de chaque sas doit être fermée en tout temps.
- Le système doit être mis à l'essai conformément à un calendrier d'essai afin de démontrer qu'il respecte les objectifs de non-disponibilité.
- L'entretien nécessaire doit être effectué de manière opportune.

Fiabilité

Le confinement (et tous les sous-systèmes s'y rapportant), comme le SAU et le SRUC doivent être très fiables. Cette haute fiabilité est obtenue par l'indépendance, la redondance et le choix de composants de qualité élevée, tel que discuté précédemment.

4.3.15 Notions principales

- La pression du système de CPN est maintenue subatmosphérique par les assécheurs de purge.
- Le confinement doit être disponible en tout temps lorsque le réacteur est exploité afin de s'assurer que les rejets sont réduits au minimum en cas d'APRP.
- Le réacteur doit être mis à l'arrêt et refroidi si le système de confinement n'est pas disponible.
- Les réacteurs seront en exploitation pour les essais normaux des composants du système de confinement. Cependant, dans certains cas (p. ex. essais de fuite), le réacteur doit être mis à l'arrêt pour l'essai.

4.4 Exercices

4.4.1 Systèmes d'arrêt

1. Nommer deux cas généraux contre lesquels le système d'arrêt protège le réacteur.
2. Nommer l'exigence opérationnelle pour le système d'arrêt.
3. Décrire les trois systèmes d'arrêt des réacteurs CANDU. Nommer ceux utilisés dans les réacteurs les plus récents.
4. Nommer 4 systèmes desquels les systèmes d'arrêt doivent être indépendants.
5. Expliquer pourquoi les systèmes d'arrêt doivent être indépendants et expliquer comment on doit procéder pour ce faire.
6. Expliquer pourquoi les systèmes d'arrêt sont des systèmes à sûreté intégrée.
7. Nommer trois dispositifs de verrouillage entre le fonctionnement des systèmes d'arrêt et les autres systèmes. Expliquer le rôle de chaque dispositif de verrouillage.
8. Expliquer la différence entre les paramètres du déclenchement absolu et les paramètres de déclenchement conditionnel et donner un exemple de chacun.

9. Pour chacune des situations anormales suivantes, nommer le paramètre du réacteur susceptible de mettre à l'arrêt le réacteur et expliquer pourquoi ce paramètre est choisi.
 - a. petit APRP
 - b. APRP grave
 - c. APR
 - d. perte d'alimentation des générateurs de vapeur
10. Expliquer la notion de paramètres de déclenchement redondants.
11. Nommer deux situations dans lesquelles le réacteur doit être mis à l'arrêt manuellement.

4.4.2 *SRUC par injection*

12. Expliquer le rôle du SRUC par injection.
13. Définir l'expression accident dû à la perte de réfrigérant primaire.
14. Les systèmes d'arrêt permettent d'arrêter le réacteur en cas d'APRP. Nommer les paramètres qui arrêteront le réacteur en cas d'APRP grave et en cas de petit APRP.
15. Nommer le paramètre principal du déclenchement du SRUC par injection.
16. Nommer trois paramètres de conditionnement de type courant pour le SRUC par injection.
17. Expliquer le rôle de chacune des trois phases opérationnelles du SRUC par injection.
18. Donner deux raisons pour lesquelles la circulation pompée dans le CC est maintenue le plus longtemps possible après un APRP.
19. Donner trois raisons pour lesquelles on a recours au refroidissement rapide lors d'un APRP.
20. Décrire les fonctions des composants principaux suivants :

- a. réservoir de stockage de l'eau du SRUC
 - b. réservoir d'accumulation ou pompe d'injection
 - c. vannes d'injection
 - d. puisard de récupération
 - e. pompes de récupération
 - f. échangeurs de chaleur de récupération.
21. Décrire la séquence de fonctionnement des composants principaux suivants :
- a. réservoir de stockage de l'eau du SRUC
 - b. réservoir d'accumulation ou pompe d'injection
 - c. vannes d'injection
 - d. puisard de récupération
 - e. pompes de récupération
 - f. échangeurs de chaleur de récupération.
22. Décrire l'exigence relative à la non-disponibilité du SRUC par injection dans un réacteur qui est trop chaud et pressurisé.
23. Définir les états opérationnels du SRUC suivants :
- a. à l'équilibre
 - b. bloqué
 - c. disponible
24. Expliquer quelle mesure on doit prendre dans le SRUC lorsqu'un réacteur est dépressurisé.
25. Nommer deux situations qui peuvent nécessiter le déclenchement manuel du SRUC.
- 4.4.3 Confinement**
26. Nommer les deux types de systèmes de confinement que l'on trouve dans les réacteurs CANDU.
27. Expliquer comment l'entrée d'énergie à long terme dans le confinement est réduite au minimum.
28. Expliquer la fonction d'un sas.
29. Définir l'expression « assurer l'étanchéité du confinement » d'un système de confinement. Préciser les circonstances dans lesquelles cette mesure est requise.
30. Décrire le fonctionnement normal des refroidisseurs d'enceinte pendant le fonctionnement normal et après un APRP.

31. Nommer trois fonctions de l'eau d'aspersion.
32. À l'aide du diagramme de la figure 4.6, expliquer comment le CPN fonctionne suite à un APRP grave.
33. À l'aide du diagramme de la figure 4.4, expliquer comment le CSP fonctionne suite à un APRP grave.
34. À l'aide du diagramme de la figure 4.6, expliquer comment un CPN fonctionne après un petit APRP.
35. À l'aide du diagramme de la figure 4.4, expliquer comment le CSP fonctionne suite à un petit APRP.
36. Expliquer le rôle du système de décharge d'air filtré.
37. Expliquer le rôle des allumeurs d'hydrogène.
38. Décrire les exigences relatives à la disponibilité pour le confinement.
39. Expliquer comment le CSP et le CPN sont habituellement maintenus en dessous de la pression atmosphérique.

5 Circuits du réacteur

5.1 Circuit du gaz annulaire

Dans cette section, nous allons examiner la construction et le rôle du circuit du gaz annulaire. Nous allons examiner les raisons pour lesquelles le CO_2 est utilisé comme gaz dans le circuit et le fonctionnement du circuit. La présente section examinera deux paramètres importants, soit la pression et le point de rosée du gaz. Enfin, nous allons voir certaines conditions anormales.

5.1.1 Rôle du circuit

Pour bien comprendre le fonctionnement du circuit du gaz annulaire, nous allons d'abord examiner l'emplacement des anneaux dans la calandre. La figure 5.1 illustre l'emplacement du gaz annulaire qui sert de frontière entre le modérateur et le circuit caloporteur.

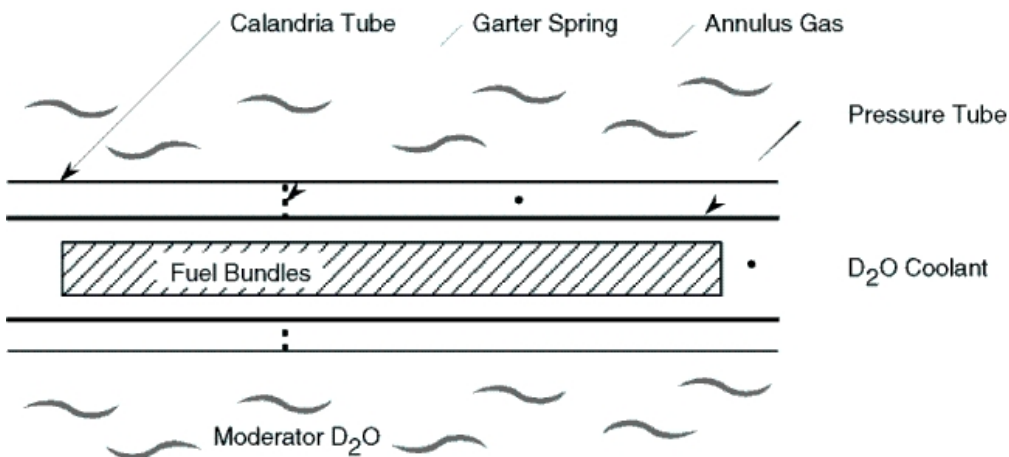


Figure 5.1 – Représentation de l'emplacement du gaz annulaire

Calandria Tube	Tube de calandre
Garter Spring	Ressort-bracelet
Annulus Gas	Gaz annulaire
Pressure Tube	Tube de force
D ₂ O Coolant	Caloporteur (D ₂ O)
Fuel Bundles	Grappes de combustible
Moderator D ₂ O	Modérateur (D ₂ O)

Le circuit, qui sert de milieu de séparation, joue les deux grands rôles suivants :

- Détecter et localiser les fuites des tubes de force ou des tubes de calandre
- Fournir une isolation thermique entre les tubes de force chauds et les tubes de calandre relativement frais. Cela permet de réduire au minimum les pertes thermiques du circuit caloporteur vers le circuit du modérateur, ce qui augmente par conséquent l'efficacité thermique du réacteur
- Les rôles secondaires du circuit du gaz annulaire comprennent notamment :
 - Fournir une atmosphère gazeuse sèche dans l'espace annulaire du canal de combustible afin d'éviter la corrosion des composants des canaux de combustible
 - Servir de fuite de drainage des circuits du caloporteur et du modérateur.

5.1.2 Choix du gaz

Le circuit du gaz annulaire doit comporter les propriétés suivantes :

- Faible conductivité thermique (bon isolant thermique)
- Faible tendance à favoriser la corrosion
- Faibles champs de rayonnement (produits d'activation limités).

De tous les gaz annulaires proposés pour les centrales CANDU, c'est le CO₂ qui a été retenu en raison de ses propriétés isolantes. En présence d'eau, de l'acide carbonique (H₂CO₃) se forme. Cet acide n'est que faiblement corrosif et ne pose aucun problème, car les quantités utilisées sont petites. Le CO₂ peut également former du C¹⁴ radioactif à partir de l'activation des neutrons du C¹³. Étant donné que le C¹³ a une abondance naturelle de 1 % et que sa section efficace d'absorption des neutrons est très petite, la quantité de C¹⁴ produite est très faible.

5.1.3 Fonctionnement du circuit

Le gaz annulaire s'écoule dans les canaux de combustible, par le collecteur de sortie puis vers les compresseurs. Les compresseurs fournissent la force motrice nécessaire pour faire circuler le gaz annulaire vers le collecteur d'entrée et le ramener dans le circuit. La circulation du gaz annulaire est importante pour la détection précoce des fuites étant donné qu'elle permet d'assurer que les lectures du point de rosée et les échantillons de gaz sont représentatifs de tous les

anneaux. Sans circulation, cela pourrait prendre beaucoup de temps (des jours) pour détecter une petite fuite de D_2O . Étant donné que la circulation continue est importante, le circuit est conçu de manière à permettre l'écoulement de gaz dans les canaux même lorsque les compresseurs ne sont pas disponibles. Il suffit d'injecter du gaz neuf à partir de l'alimentation brute par la vanne de régulation de la pression et d'aérer à l'atmosphère par les conduites de purge grâce aux moniteurs de contamination. Lorsqu'il y a une fuite, la plupart des centrales éventent le confinement pour récupérer la vapeur. Ce mode de circulation sans les compresseurs porte le nom de mode de purge continue. L'addition de gaz en bouteille par les vannes de régulation de pression est l'alimentation normale fournie au circuit du gaz annulaire.

Les analyseurs de point de rosée dans le collecteur de sortie principal font une lecture du point de rosée. Ces lectures ainsi que des lectures de la température et de la pression sont analysées dans la salle de commande principale à des fins de comparaison. Il y a également des postes d'échantillonnage, habituellement aux collecteurs de sortie principaux, qui permettent d'échantillonner manuellement le gaz.

Les conduites du circuit sont disposées de telle sorte que tout liquide dans le circuit est drainé par gravité vers le collecteur de purge. Un détecteur d'humidité dans le collecteur indiquera la présence de liquide. Le détecteur d'humidité est un dispositif qui détecte l'humidité des fuites. Ces détecteurs peuvent détecter des fuites sur le plancher et dans les conduites ou les réservoirs.

Dans certaines centrales, il y a un système d'addition d'oxygène raccordé au collecteur en aval des compresseurs. De petites quantités d'oxygène gazeux sont ajoutées au gaz annulaire afin de favoriser la formation d'une couche d'oxyde plus dure à l'extérieur des tubes de force. Dans la plupart des centrales, les circuits seront dotés de ce système. L'oxygène peut également être utilisé pour purger tout dépôt solide de C^{14} en le convertissant en CO_2 . Cela permet de décontaminer avant les pannes (la concentration de O_2 sera plus élevée que les valeurs d'exploitation normale).

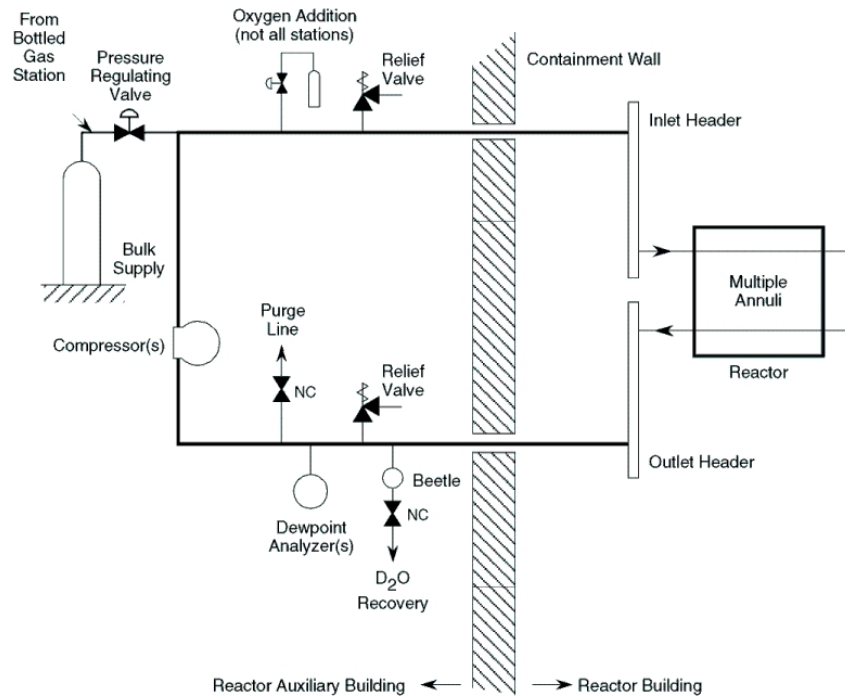


Figure 14.2
Circuit du gaz annulaire simplifié

From Bottled Gas Station	En provenance de la station de gaz en bouteille
Pressure Regulating Valve	Vanne de réglage de la pression
Oxygen Addition (not all stations)	Addition d'oxygène (pas dans toutes les centrales)
Relief Valve	Vanne de décharge
Containment Wall	Paroi du confinement
Bulk Supply	Alimentation brute
Compressor(s)	Compresseur(s)
Purge Line	Conduite de purge
NC	RP
Dewpoint Analyzer(s)	Analyseur de point de rosée
Relief Valve	Vanne de décharge
Beetle	Détecteur de fuite
NC	RP
D ₂ O Recovery	Récupération du D ₂ O
Reactor Auxiliary Building	Bâtiment des auxiliaires du réacteur
Reactor Building	Bâtiment réacteur
Inlet Header	Collecteur d'entrée
Multiple Annuli	Anneaux multiples
Reactor	Réacteur
Outlet Header	Collecteur de sortie

5.1.4 Pression du gaz annulaire

Le circuit du gaz annulaire doit être en service avant le démarrage du réacteur ou la pressurisation du CC. Une pression positive est maintenue afin d'éviter l'infiltration d'air. Ce circuit doit demeurer pressurisé même lorsque le réacteur est mis à l'arrêt. Lorsqu'il y a infiltration d'air, l'activation de l'argon dans l'air peut donner lieu à des champs gamma élevés.

Lorsque le circuit caloporteur est froid, la pression du gaz annulaire est réglée à une faible valeur, habituellement 14 kPa (manométrique). À mesure que la puissance du réacteur augmente, la pression du gaz annulaire augmente en raison de la dilatation thermique, qui est habituellement dans l'intervalle de 25 à 100 kPa (manométrique). Lorsque la pression diminue en deçà de cette valeur seuil, l'opérateur peut ramener la pression grâce à la vanne de régulation de pression.

5.1.5 Point de rosée

L'analyseur de point de rosée mesure la teneur en humidité du gaz annulaire. Des signaux sont envoyés à la salle de commande où ils sont analysés et comparés de manière à établir une tendance des fuites. Le taux d'augmentation du point de rosée peut également être établi comme exigence de purge.

Les niveaux d'humidité admissibles dans le gaz annulaire sont habituellement exprimés sous forme de point de rosée et varient d'une centrale à l'autre. La plage de fonctionnement habituelle du point de rosée se situe entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ comme valeur de fonctionnement normale.

5.1.6 Purge du circuit

Lorsque la teneur en humidité du gaz s'approche de la limite supérieure du point de rosée, il faut purger le gaz. Du gaz sec neuf est utilisé en vue de remplacer le gaz impur pour les raisons suivantes :

- Éliminer l'humidité accumulée qui pourrait autrement contribuer à une corrosion élevée et masquer les petites fuites. La purge permet d'éviter l'accumulation des produits de corrosion et d'éviter le blocage des tubes de raccord des anneaux du canal.
- Éliminer les impuretés dues à la corrosion, les plus importants étant l'acide nitrique formé à partir du N_2 et du O_2 suite à une infiltration d'air.

- Éliminer l'air du circuit, habituellement suite à un entretien du circuit.
- Réduire les champs gamma dans les zones accessibles, lorsqu'il y a formation de Ar^{41} par suite d'une infiltration d'air.
- Faire baisser le point de rosée avant le démarrage du réacteur à partir de l'arrêt froid. À mesure que le réacteur se réchauffe, la température et la pression augmenteront dans le circuit du gaz annulaire. La pression partielle de toute vapeur d'eau dans le circuit augmentera également, ce qui fera monter le point de rosée. Pour contrecarrer cet effet, le point de rosée est abaissé avant le réchauffement par une purge à l'aide de gaz sec.
- Maintenir la capacité de détection des fuites en assurant un écoulement de gaz dans le circuit lorsque les compresseurs ne sont pas disponibles.

5.1.7 *Notions principales*

- Le CO_2 possède les propriétés avantageuses suivantes :
 - Faible conductivité thermique
 - Faible corrosion
 - Produits d'activation limités.
- Le gaz annulaire doit circuler ou être purgé afin de s'assurer que les mesures du point de rosée et l'échantillonnage de gaz sont représentatifs de tous les anneaux.
- La pression du circuit doit être maintenue au-dessus de la pression atmosphérique afin d'éviter l'infiltration d'air. La plage habituelle se situe entre 25 et 100 kPa (manométrique).
- Le point de rosée est surveillé afin de détecter l'humidité imputable aux fuites. Un système étanche doit avoir un point de rosée se situant entre -40 °C et -10 °C .
- La purge est parfois nécessaire pour les raisons suivantes :
 - Éliminer l'humidité accumulée

- Éliminer les impuretés dues à la corrosion, comme l'acide nitrique
- Éliminer l'air du circuit
- Réduire les champs gamma
- Maintenir la capacité de détection des fuites lorsque les compresseurs ne sont pas disponibles
- Faire baisser le point de rosée avant le démarrage à partir de l'état froid

5.1.8 Conditions anormales dans le réacteur

Pression élevée du gaz annulaire

L'augmentation de la pression du gaz annulaire peut avoir les causes suivantes :

- Rupture d'un tube de force
- Effets thermiques dus à une augmentation de la puissance du réacteur
- Défaillance de la régulation de la pression

La surpression du gaz annulaire peut causer de la déformation, de la fatigue ou même la rupture des tubes de calandre ou encore, de la fatigue ou une rupture des joints des soufflets qui raccordent le circuit du gaz annulaire au raccord d'extrémité du tube de force.

Les vannes de décharge assurent une protection contre la surpression. Dans certaines centrales, on utilise des disques de rupture à la sortie du compresseur conjugués à des vannes de décharge.

Faible pression du gaz annulaire

La pression du gaz annulaire peut diminuer pour les raisons suivantes :

- Fuite du circuit
- Perte d'alimentation de gaz brut
- Retrait du circuit lors du refroidissement du réacteur

Il est possible de tirer du vide du circuit si ce dernier est isolé et refroidi. La pression inférieure à la pression atmosphérique dans le circuit du gaz annulaire pourrait entraîner l'effondrement des tubes de calandre. Lorsque cela est possible, le circuit doit être repressurisé par le réservoir de stockage d'eau brute et les fuites doivent être réparées. Des fuites d'air à l'intérieur peuvent également poser problème en cas de faible pression du gaz annulaire en raison de l'augmentation résultant de radioactivité.

Fuite de gaz annulaire

Le gaz annulaire peut s'échapper par des fuites de conduite ou des fuites des soufflets de canal. Cela présente un danger d'irradiation et diminue la capacité de vérifier les tendances de la pression. Le gaz annulaire qui s'échappe des points de fuite peut contenir de la radioactivité sous l'une des formes suivantes :

- C^{14} , produit d'activation, sous forme de gaz CO_2 ou de matières particulaires
- Des produits de fission entraînés et de la contamination libre issus des produits de fission
- Du tritium dû aux fuites de D_2O .

La fuite de gaz annulaire peut également causer une faible pression du gaz annulaire qui, comme nous l'avons mentionné précédemment, peut causer des fuites d'air à l'intérieur.

Présence d'air dans le gaz annulaire

Les travaux d'entretien ou les fuites du circuit permettent des infiltrations d'air dans le gaz annulaire.

La présence d'air pose un danger d'irradiation et produit de l'acide nitrique corrosif (à cause du N_2). Le danger d'irradiation principal est posé par le Ar^{41} , produit d'activation. Parmi les autres dangers d'irradiation, mentionnons notamment le C^{14} provenant du N^{14} et le N^{16} ainsi que le O^{19} provenant du O^{16} et du O^{18} . L'humidité de l'air dans le circuit peut masquer les fuites.

Teneur en humidité élevée ou croissante

Une augmentation du point de rosée indique qu'il y a une augmentation de la teneur en humidité du gaz annulaire.

Les causes possibles d'une augmentation ou d'un point de rosée élevé peuvent être :

- Fuite d'un tube de force
- Fuite d'un tube de calandre
- Infiltration d'air
- Alimentation en gaz annulaire impur

La cause la plus probable d'un point de rosée qui demeure élevé après la purge est la fuite d'un tube de force, en raison de la pression et de la température élevées du CC. Il existe deux préoccupations opérationnelles lorsque le point de rosée augmente. D'abord, le circuit contaminé fuit et cela présente des préoccupations radiologiques et un risque d'APRP consécutif avec dommages possibles au tube de calandre et au combustible. La fuite augmentera éventuellement au fil du temps alors que les changements de puissance entraîneront des changements de température dans le circuit qui fuit. Deuxièmement, un danger de température et de pression élevées existe dans le cas d'une fuite du CC.

5.1.9 Détermination de l'emplacement des fuites

Pour localiser une source de fuite, on prélève un échantillon de fluide condensé en passant un courant de gaz annulaire humide dans un *Cold Finger*. Le *Cold Finger* est un piège de glace sèche ou un bain cryogénique qui gèle l'humidité. L'échantillon est ensuite analysé afin de déterminer si la source est le circuit caloporteur ou le modérateur. Un mode de fonctionnement stagnant est alors utilisé pour localiser la fuite annulaire. Les compresseurs sont fermés et isolés et les vannes de purge sont fermées afin :

- de maximiser la condensation du D₂O dans les canaux défectueux
- de réduire l'étendue de l'humidité dans le circuit de gaz annulaire.

La recherche des fuites comprend également la vérification des températures de sortie des canaux. Le canal de combustible qui fuit transfère de la chaleur du tube de force vers le tube de calandre en passant par le D₂O qui fuit. Si l'espace gazeux qui entoure le tube de force qui fuit se remplit de D₂O, le taux de transfert thermique augmente afin de réduire efficacement la température de sortie du

canal. Cependant, les données relatives à la température de sortie du canal n'indiquent pas nécessairement quel est le tube de force qui fuit jusqu'à ce que suffisamment de fluide se condense et s'accumule. On doit garder à l'esprit que les températures de sortie de canal faibles ont peut-être une autre cause, comme un contact entre le tube de force et le tube de calandre.

À noter qu'une alarme de détecteur de fuite peut prendre un certain temps avant de se faire entendre, selon l'emplacement et la taille de la fuite. Une vitre d'observation peut également permettre dans certaines centrales de détecter l'écoulement liquide d'un anneau en particulier.

5.1.10 Notions principales

Dans les conditions suivantes, des préoccupations sont indiquées pour certaines conditions :

Conditions	Préoccupations
Pression de gaz élevée	Défaillance ou rupture d'un tube de calandre, défaillance ou rupture des joints des soufflets en cas de défaillance de la protection contre la surpression.
Faible pression de gaz	Infiltration d'air, effondrement des tubes de calandre.
Fuite de gaz	Danger d'irradiation, capacité réduite à vérifier les tendances de la pression.
Présence d'air dans le circuit	Danger d'irradiation, principalement Ar ⁴¹ , production d'acide nitrique corrosif, humidité masquant les fuites.
Point de rosée élevé ou croissant	Danger de pression et de température élevées avec risque d'APRP, préoccupations radiologiques.

Le système peut être mis en mode stagnant pour déterminer l'emplacement d'une fuite confirmée de gaz annulaire en maximisant la condensation de D₂O dans les canaux défectueux et en réduisant l'étendue de l'humidité dans l'ensemble du circuit de gaz annulaire.

5.2 Système de refroidissement du blindage

Il existe trois types de blindages, ou de boucliers qui sont utilisés dans les réacteurs CANDU pour protéger le personnel et l'équipement. Ces boucliers comprennent notamment :

- a) boucliers d'extrémité de calandre – protègent le personnel contre les rayons γ dans l'enceinte du réacteur pendant les mises à l'arrêt seulement.
- b) blindage biologique – protège le personnel contre le rayonnement, principalement les rayons γ et les neutrons rapides pendant le fonctionnement du réacteur.
- c) blindage thermique – protège l'équipement et les structures contre la chaleur générée par l'absorption du rayonnement nucléaire et thermique émis par le réacteur.

Dans la plupart des centrales, les boucliers thermiques et biologiques sont combinés.

Cette section porte sur les exigences relatives au refroidissement normal et au refroidissement à l'arrêt des systèmes de refroidissement du blindage et sur les conséquences néfastes de la perte de refroidissement du blindage. Le drainage du circuit de refroidissement du bouclier d'extrémité sera également examiné.

5.2.1 Boucliers d'extrémité de la calandre

Exigences relatives au refroidissement

Pendant le fonctionnement normal, de la chaleur est générée dans les composants du bouclier d'extrémité à la fois par l'absorption du rayonnement (neutron et γ) et par conduction thermique. Cette chaleur ne peut pas s'accumuler étant donné qu'elle pourrait endommager les composants du réacteur à cause des contraintes thermiques excessives. Le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité doit évacuer cette chaleur.

Les limites opérationnelles supérieures et inférieures de la température sont établies pour le bouclier d'extrémité afin d'éviter que des contraintes thermiques trop grandes se développent entre le bouclier d'extrémité et la calandre. L'enveloppe de calandre et les composants du bouclier d'extrémité sont soudés ensemble et contiennent de

nombreux joints dudgeonnés. Une ΔT excessive dans l'une ou l'autre direction causera une augmentation de la dilatation différentielle, qui est considérablement restreinte à cause de la conception. Des dommages structuraux comme des joints de soudure fissurés, des joints dudgeonnés défectueux et des dalles de blindage déplacées (s'il y a lieu) peuvent se produire. Un paramètre important est alors la différence de température (ΔT) entre le modérateur et les boucliers d'extrémité. (Les valeurs courantes des températures du bouclier d'extrémité sont de ~ 60 °C à l'entrée et de 65 à 70 °C à la sortie. Les températures courantes du modérateur à l'entrée et à la sortie sont de 40 °C/60 °C).

À la pleine puissance, la chaleur produite au bouclier d'extrémité sera habituellement inférieure à 1 % de la puissance thermique totale du réacteur. Les sources de chaleur sont réparties comme suit :

- a) environ 30 % de la chaleur est due à l'absorption des neutrons et des rayons γ provenant de la fission et des produits de fission (désintégration γ).
- b) le reste est dû à la chaleur provenant des raccords d'extrémité chauds et au modérateur.

Types de conception

Tous les boucliers d'extrémité des réacteurs CANDU sont refroidis à l'eau et il en existe deux conceptions principales.

La première conception utilise des dalles en acier au carbone refroidi à l'eau ordinaire (fig. 5.3). Les dalles en acier au carbone sont regroupées de manière à constituer une section épaisse unique centrée dans le bouclier d'extrémité. Cette section épaisse, combinée aux bouchons d'extrémité des canaux, assure un blindage à l'arrêt à l'extrémité du réacteur. Le refroidissement entre le bouclier en acier et chacune des plaques tubulaires est assuré. L'écoulement de refroidissement est dirigé du bas vers le haut de chaque bouclier et dans l'espace entre les tubes de réseau (raccords d'extrémité des canaux de combustible).

La deuxième conception utilise des billes en acier au carbone comme blindage et est également refroidi à l'eau ordinaire (fig. 5.3). Cette conception assure un meilleur transfert thermique pour un refroidissement amélioré et des coûts de construction moins élevés que la conception à dalles. Cette conception permet également de supporter des ΔT élevées, pour ce qui est des contraintes thermiques du bouclier

d'extrémité et des composants de calandre. Toutes les nouvelles centrales utilisent cette conception.

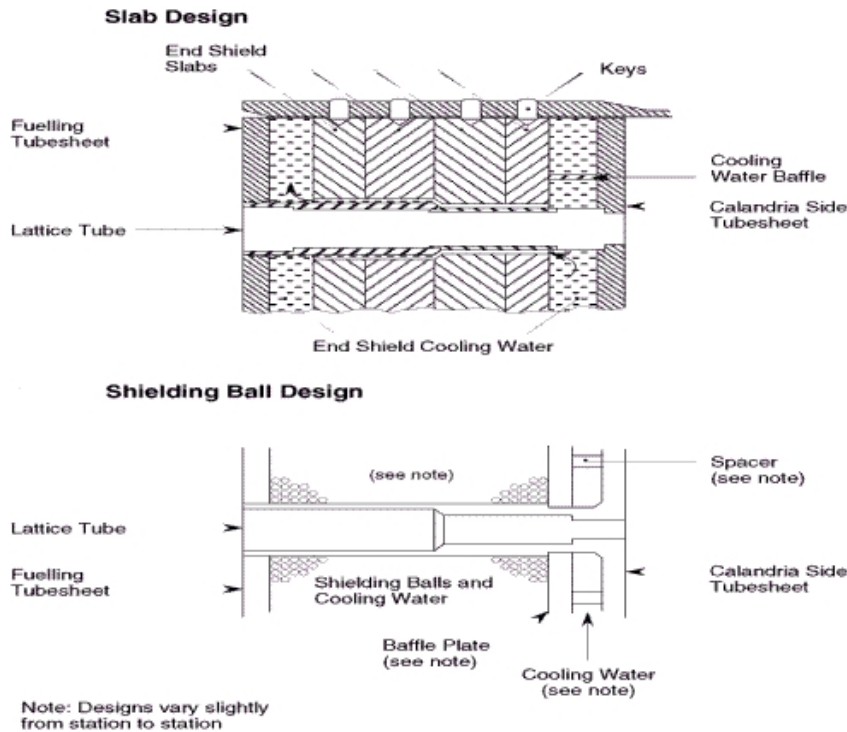


Figure 5.3 – Conceptions de base des boucliers d'extrémité

Slab Design	Conception à dalles
End Shield Slabs	Dalles du bouclier d'extrémité
Fuelling Tubesheet	Plaque tubulaire côté machine de chargement
Keys	Clés
Lattice Tube	Tube de réseau
Cooling Water Baffle	Chicane pour l'eau de refroidissement
Calandria Side Tubesheet	Plaque tubulaire côté calandre
End Shield Cooling Water	Eau de refroidissement du bouclier d'extrémité
Shielding Ball Design	Conception à billes de blindage
Lattice Tube	Tube de réseau
Fuelling Tubesheet	Plaque tubulaire côté machine de chargement
(see note)	(voir remarque)
Spacer (see note)	Espaceur (voir remarque)
Shielding Balls and Cooling Water	Billes de blindage et eau de refroidissement
Calandria Side Tubesheet	Plaque tubulaire côté calandre
Note: Designs vary slightly from station to station	Remarque : les conceptions diffèrent quelque peu d'une centrale à l'autre
Baffle Plate (see note)	Défecteur (voir remarque)

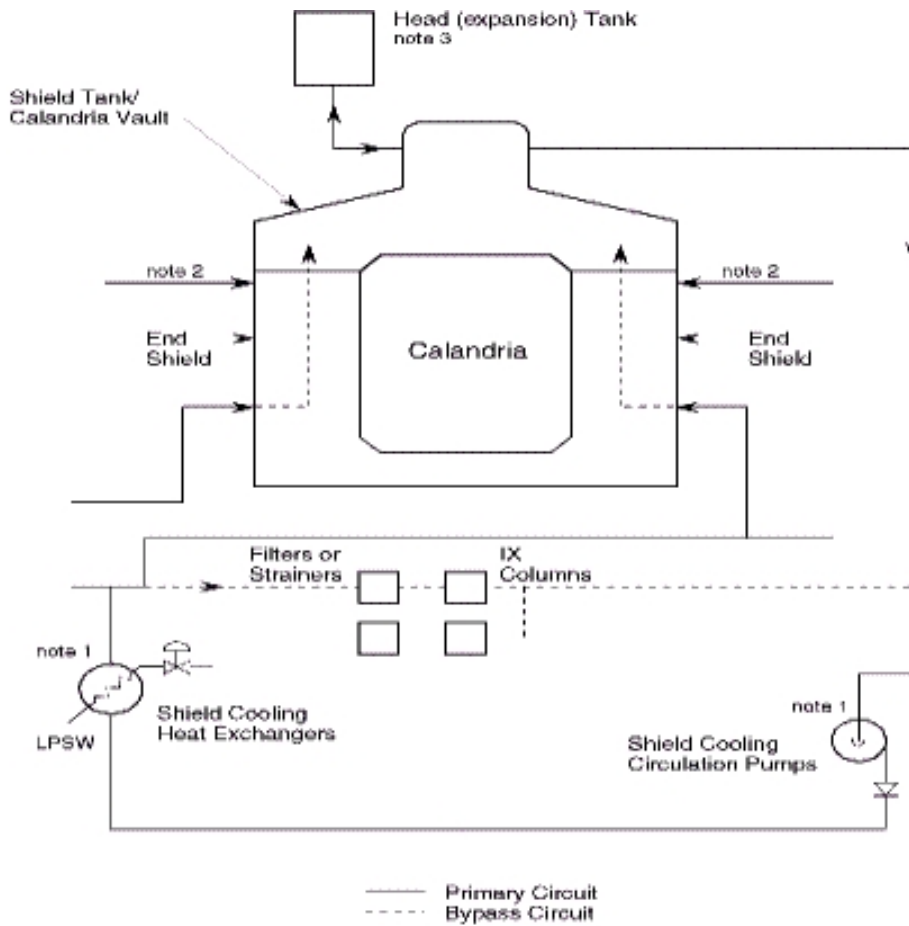
Cooling Water (see note)	Eau de refroidissement (voir remarque)
--------------------------	--

5.2.2 Refroidissement des boucliers d'extrémité

Une conception de refroidissement des boucliers de type courant est illustrée à la figure 5.4. Le circuit de refroidissement du bouclier comprend des pompes, des échangeurs de chaleur, un circuit d'épuration de contournement et une bêche de détente.

Le circuit fait circuler l'eau ordinaire déminéralisée par les boucliers d'extrémité afin d'évacuer la chaleur provenant des dalles de blindage ou des billes. L'eau est refroidie, nettoyée et utilisée ailleurs comme blindage dans le système (dans le blindage, s'il y a lieu).

L'eau qui circule est purifiée par des filtres (ou crépines) et des colonnes échangeuses d'ions afin de réduire au minimum et d'éliminer les produits de corrosion. Ces produits de corrosion sont présents parce que de l'acier au carbone est utilisé dans les boucliers d'extrémité (billes ou dalles en acier, blindage). Ces produits doivent être éliminés afin de réduire au minimum l'étendue de la contamination par le transport de produits de corrosion activés. Pour réduire au minimum la corrosion, le pH du système de refroidissement du bouclier est contrôlé de manière à se situer entre 9,8 et 10,7 à l'aide d'une résine de LiOH dans les colonnes échangeuses d'ions.



Note : 1. Number and capacity of components varies from station to station.
 2. To baffle area or distribution pipes in tank.
 3. Connected directly to pump suction in some stations.

Figure 5.4 – Schéma simplifié du bouclier d'extrémité et des systèmes de refroidissement du blindage

Shield Tank/Calandria Vault	Blindage/voûte de calandre
Head (expansion) Tank note 3	Bâche de détente remarque 3
note 2	remarque 2
End Shield	Bouclier d'extrémité
Calandria	Calandre
Filters or Strainers	Filtres ou crépines
IX Columns	Colonnes échangeuses d'ions
note 1	remarque 1
LPSW	ESBP
Shield Cooling Heat Exchangers	Échangeurs de chaleur pour le refroidissement des boucliers
Shield Cooling Circulation Pumps	Pompes de circulation du système de refroidissement des boucliers
Primary Circuit	Circuit primaire

Bypass Circuit	Circuit de contournement
Note: 1. Number and capacity...	Remarques : 1. Le nombre et la capacité des composants varient d'une centrale à une autre.
2. To baffle area or...	2. Vers la zone des chicanes ou les conduites de distribution dans le blindage.
3. Connected directly...	3. Raccordée directement à l'aspiration de pompe dans certaines centrales.

La bêche de détente est raccordée au prolongement du blindage au-dessus du plancher des mécanismes de contrôle de la réactivité, ou directement à l'aspiration de pompe dans certaines centrales. Elle a pour rôle de supporter le retrait et le gonflement du caloporteur et d'assurer ainsi un niveau adéquat, et de fournir une hauteur d'aspiration de pompe positive pour les pompes de circulation afin d'éviter la cavitation. Les flux gamma et les flux de neutrons peuvent causer une radiolyse dans les boucliers d'extrémité, ce qui cause un danger associé à l'hydrogène dans la bêche de détente. Pour réduire au minimum ce danger, la bêche de détente est ouverte vers la sortie contaminée afin d'aérer l'hydrogène et dans certaines centrales de purger l'azote.

Les pompes font circuler le caloporteur par les boucliers d'extrémité (et le blindage), les échangeurs de chaleur et la boucle d'épuration. Les pompes sont alimentées par une source de catégorie III afin de s'assurer que la circulation est restaurée rapidement suite à une perte d'alimentation de catégorie IV. La raison en est que des dommages pourraient se produire en raison des contraintes thermiques des boucliers d'extrémité et de la calandre qui sont trop importantes (à cause de la perte d'écoulement de refroidissement).

Les échangeurs de chaleur transfèrent la chaleur du caloporteur ayant circulé dans les boucliers d'extrémité vers l'eau de service. Le contrôle de la température se fait par régulation des vannes de contrôle du côté de l'eau de service des échangeurs de chaleur. La température est contrôlée de manière à être environ équivalente à la température du modérateur, ce qui permet d'éviter des ΔT importantes et des contraintes thermiques résultantes entre le bouclier d'extrémité et la calandre. Cette eau de service transfère ensuite la chaleur vers l'environnement.

Certains paramètres, autres que la température du bouclier d'extrémité et la température de sortie/d'entrée des échangeurs de chaleur, qui sont disponibles pour contrôler le refroidissement comprennent notamment :

- les niveaux du bouclier caisson et de la bêche de détente, afin de s'assurer que suffisamment de caloporteur est disponible pour le refroidissement, c.-à-d. qu'il n'y a aucun point sec, et de s'assurer qu'il n'y a pas de cavitation des pompes de circulation. Ces niveaux permettent également d'indiquer les changements de température par le retrait et le gonflement du caloporteur. En outre, cela pourrait signifier qu'il y a des fuites dans le circuit.
- L'écoulement brut du caloporteur permet de s'assurer que le caloporteur circule et qu'il actionnera automatiquement la capacité de pompage additionnel au besoin.
- La mesure de la pression à l'aspiration de pompe, la décharge, la décharge des échangeurs de chaleur et la ΔP de part et d'autre de l'échangeur de chaleur indiqueront qu'il y a des problèmes d'écoulement, c.-à-d. l'emplacement de la brèche, les blocages de l'écoulement, etc.

5.2.3 Perte de refroidissement du bouclier d'extrémité

La température des boucliers d'extrémité augmentera immédiatement s'il y a perte de refroidissement. Cela pourrait causer une grande ΔT entre le bouclier d'extrémité et la calandre. Des mesures instantanées sont requises (habituellement seulement quelques minutes s'écoulent avant la deuxième étape dans la liste suivante), notamment :

1. Vérification et correction des lacunes du système de refroidissement. Les causes possibles sont :
 - fonctionnement des vannes de contrôle de l'eau de service et de la température
 - fonctionnement des pompes (cavitation des pompes et absence de circulation du caloporteur, etc.)
 - bouclier caisson et bêche de détente (faible niveau)
 - fuite importante (faible pression, faible niveau de la bêche de détente)
 - mauvais fonctionnement du circuit de refroidissement du modérateur, ce qui entraîne un transfert thermique accru vers le bouclier d'extrémité.

2. Si les mesures/vérifications précitées ne réussissent pas, on doit réduire la puissance du réacteur jusqu'à ce que la capacité d'évacuation de la chaleur du circuit de refroidissement des boucliers correspondent à la production de chaleur. Dans certaines centrales, cette mesure est automatique grâce à la baisse contrôlée de puissance en cas de perte de l'écoulement (RBE) ou de l'arrêt des pompes.
3. Si les mesures précitées ne réussissent pas, il faut refroidir le CC (ou procéder à un refroidissement rapide dans certaines centrales).

5.2.4 Exigences relatives au circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité

Le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité doit être fonctionnel à tous les niveaux de puissance du réacteur. On ne peut le mettre hors service que si certaines conditions sont respectées. Bien que les aspects détaillés varient d'une centrale à une autre, le circuit de refroidissement des boucliers peut être mis à l'arrêt si les conditions suivantes sont satisfaites :

- le réacteur a été mis à l'arrêt pour une période de temps spécifique (4 à 24 heures)
- la température du modérateur est inférieure à une limite spécifiée (~38 à 40 °C)
- le CC est froid ($\leq \sim 55$ °C)

Ces conditions permettent de s'assurer que l'entrée de chaleur dans le bouclier d'extrémité ne causera pas de dommage à cause des contraintes trop élevées. Lorsque le réacteur est à l'arrêt et que le CC et le modérateur sont refroidis, la source de chaleur est principalement de la désintégration γ , qui atteint des niveaux extrêmement bas, comparativement aux sources de chaleur d'exploitation. Cette chaleur est évacuée par convection naturelle par l'atmosphère de l'enceinte du réacteur, ainsi que par le circuit du modérateur et le circuit caloporteur (toujours refroidis).

Des précautions spéciales doivent être prises lorsqu'il faut drainer le bouclier d'extrémité. Sans eau dans les boucliers d'extrémité, le refroidissement par convection naturelle de l'eau à l'intérieur du bouclier d'extrémité (mentionné précédemment) serait perdu, ce qui pourrait causer des contraintes thermiques possibles et des dommages.

Sans l'effet de blindage de l'eau, les champs de rayonnement pourraient atteindre des milliers de R/h à la face du réacteur. La protection contre la corrosion assurée par l'eau sera également perdue, ce qui donnera lieu à de la corrosion (en raison de l'accès de l'air aux surfaces mouillées) et éventuellement à des produits d'activation et un transport de la radioactivité. Le drainage du système exige que :

1. une analyse des contraintes détaillées soit faite pour s'assurer que les contraintes dues aux effets thermiques ne dépassent pas certaines limites de conception
2. des mesures visant à contrôler la corrosion sont mises en oeuvre
3. l'accès aux zones du réacteur est restreint ou un blindage additionnel est fourni pour compenser la perte de blindage de l'eau.

À noter qu'une approbation de la CCSN pourrait également être requise (selon la centrale), étant donné que les risques d'exposition accrue du personnel de centrales est possible. Par conséquent, le bouclier caisson et le circuit de refroidissement du bouclier ne seront pas drainés dans des circonstances normales.

5.2.5 Boucliers thermiques

Il existe deux types de conception de boucliers thermiques qui sont utilisés dans les réacteurs CANDU.

La première conception utilise des plaques internes dans la calandre. Les plaques de la paroi d'étanchéité en acier inoxydable sont épaisses et soutenues à l'intérieur de l'enveloppe de calandre. Le rayonnement gamma, les neutrons rapides (dus aux fuites) et la chaleur provenant du cœur donnent lieu au réchauffement de ces plaques.

Le refroidissement du bouclier thermique est assuré par le D₂O (modérateur) du circuit de refroidissement du modérateur. Malheureusement, dans cette conception, la chaleur qui s'échappe du réacteur rend nécessaire l'utilisation d'un système de refroidissement dans le blindage en béton avoisinant. Nous examinerons ce point plus tard, au moment de considérer l'évitement des dommages causés au bouclier biologique. Ce système réduit la capacité requise du système de refroidissement du bouclier biologique.

La deuxième conception utilise un réservoir de blindage rempli d'eau qui entoure la calandre. Dans certaines centrales, on utilise un

réservoir en acier, alors que d'autres utilisent une structure en béton à paroi en acier. Ce réservoir entoure et supporte le cœur du réacteur et l'eau qui s'y trouve absorbe les rayons γ , les neutrons rapides et la chaleur provenant du cœur du réacteur. Ce blindage d'eau assure un bouclier biologique au-dessus du réacteur (appelé plancher des mécanismes de contrôle de la réactivité) et sert de blindage pour l'accès en cas de mise à l'arrêt. Cette conception est utilisée dans les nouvelles centrales. Étant donné qu'aucun refroidissement de blindage biologique distinct n'est requis, les avantages de cette conception sont une durée et des coûts de construction réduits comparativement à l'autre conception (qui exige des essais prolongés des conduites de refroidissement intégrés au blindage biologique). Le refroidissement de ce bouclier thermique se fait par le circuit de refroidissement des boucliers d'extrémité que nous avons vu précédemment à la figure 5.4.

Dans les deux conceptions de boucliers thermiques, le refroidissement est assuré par un autre système, c.-à-d. le circuit du modérateur ou le circuit de refroidissement du bouclier. Ainsi, le pourcentage de chaleur évacuée dans ces circuits de refroidissement comprend également la chaleur générée dans les boucliers thermiques.

5.2.6 Blindage biologique

La conception du blindage biologique reflète l'efficacité du blindage thermique.

Dans le cas du blindage thermique intérieur à la calandre, un blindage additionnel entourant la calandre est requis. Ce bouclier, appelé blindage ou bouclier biologique, est constitué de béton lourd et est compris dans les parois, le plafond, le plancher et les trappes de l'enveloppe de la calandre. Ce bouclier est chauffé à cause de l'absorption des neutrons et du rayonnement γ provenant du cœur ainsi que par la chaleur thermique émise par convection et irradiant du cœur. Le refroidissement de ce bouclier est requis afin de limiter la température du béton à ~ 60 °C. À des températures plus élevées, l'eau est dirigée hors du béton, ce qui peut donner lieu aux conséquences néfastes suivantes :

- a) contraintes thermiques pouvant causer l'éclatement et la fissuration du béton, réduisant ainsi sa résistance mécanique.
- b) avec moins d'eau dans le béton, ce bouclier est moins efficace contre les neutrons.

Le refroidissement du béton du bouclier biologique est assuré par un écoulement d'eau dans les conduites intégrées dans le béton. L'eau de refroidissement circule à l'aide d'un système indépendant, semblable au système de refroidissement du bouclier d'extrémité, qui comprend des pompes, des échangeurs de chaleur, une bêche de détente et un système de filtre de contournement. La chaleur évacuée par ce système est habituellement inférieure à 0,1 % de la pleine puissance du réacteur.

Pour les boucliers thermiques de conception bouclier caisson rempli d'eau ou conception à voûte, le refroidissement des structures de blindage biologique en béton n'est pas requis. L'efficacité du bouclier thermique est suffisante pour éliminer la nécessité d'installer des conduites de refroidissement dans les structures de confinement/blindage.

5.2.7 *Notions principales*

- Les boucliers d'extrémité et les boucliers biologiques/thermiques nécessitent un refroidissement pour évacuer la chaleur provenant de l'absorption du rayonnement γ , des neutrons et de la chaleur thermique provenant du cœur du réacteur. Un refroidissement est requis pendant le fonctionnement à tous les niveaux de puissance du réacteur et pendant un certain temps après la mise à l'arrêt.
- La température du bouclier d'extrémité doit être limitée afin d'éviter qu'il y ait des contraintes thermiques entre le bouclier d'extrémité et l'enveloppe de calandre. Des dommages pourraient résulter de ces contraintes élevées.
- L'évacuation de la chaleur du bouclier d'extrémité en régime de puissance se situera entre 0,2 et 0,6 % de la pleine puissance du réacteur. Lorsqu'il y a mise à l'arrêt et que le CC et le circuit du modérateur sont refroidis, la production de chaleur sera principalement attribuable à la désintégration γ . Cette source de chaleur est petite et le refroidissement par convection sera adéquat.
- L'évacuation de la chaleur des boucliers d'extrémité se fait par transfert de chaleur des dalles ou billes en acier vers le caloporteur en circulation, puis dans les échangeurs de chaleur du caloporteur vers l'eau de service, qui est rejetée dans l'environnement.

- Des précautions spéciales doivent être prises si les boucliers d'extrémité doivent être drainés. Les contraintes résultant de la perte de refroidissement doivent être déterminées; des mesures visant à protéger le réacteur contre la corrosion des systèmes et les champs élevés de rayonnement doivent être prises.
- La boucle d'épuration du circuit de refroidissement du bouclier d'extrémité permet d'éliminer les produits de corrosion radioactifs du circuit. Ces produits de corrosion sont éliminés afin de s'assurer que le transport de la radioactivité dans le circuit est réduit au minimum.
- Parmi les autres paramètres qui sont surveillés afin d'assurer un refroidissement adéquat des boucliers d'extrémité, mentionnons l'écoulement dans le circuit, les niveaux du bouclier caisson et de la bêche de détente et la pression du circuit.
- Les mesures requises en cas de perte de refroidissement du bouclier d'extrémité consistent à restaurer le refroidissement, à réduire la puissance du réacteur et à refroidir le CC au besoin afin de maintenir la ΔT .
- La perte de refroidissement vers les boucliers thermiques/biologiques donnera lieu à une surchauffe des structures en béton, ce qui causera un assèchement du béton, entraînant des dommages et un blindage réduit contre les neutrons.
- L'évacuation de la chaleur du bouclier biologique (lorsque des circuits de refroidissement sont installés) sera de $<0,1$ % de la pleine puissance du réacteur.

5.3 Exercices

5.3.1 Gaz annulaire

1. Nommer trois propriétés souhaitables de l'utilisation du CO_2 comme gaz annulaire.
2. Le circuit du gaz annulaire fonctionne normalement même lorsque le réacteur est à l'arrêt. Pourquoi?

3. Le point de rosée est l'un des paramètres d'exploitation les plus importants pour le circuit du gaz annulaire. Pourquoi?
4. Pourquoi surveille-t-on la pression du gaz annulaire?
5. Nommer les plages de fonctionnement courantes pour les paramètres suivants :
 - a. point de rosée
 - b. pression
6. Donner six raisons pour lesquelles la purge est requise.
7. Dans quelle condition d'exploitation les compresseurs du gaz annulaire doivent-ils être arrêtés et isolés?
8. Pour chacune des conditions anormales suivantes, nommer deux grandes préoccupations relatives à l'exploitation :
 - a) pression élevée du gaz annulaire (2)
 - b) faible pression du gaz annulaire (2)
 - c) fuite de gaz annulaire (2)
 - d) air dans le gaz annulaire (2)
 - e) niveaux d'humidité élevés ou augmentation de ce niveau (2)

5.3.2 Refroidissement du blindage

9. Nommer deux sources de chaleur qui réchauffent le bouclier et préciser la puissance thermique approximative du réacteur qui est dissipée dans le bouclier d'extrémité.
10. Décrire les conséquences de l'absence de refroidissement du bouclier d'extrémité.
11. Décrire les voies de transfert thermique pour le circuit de refroidissement du bouclier d'extrémité.
12. Expliquer pourquoi le refroidissement du bouclier d'extrémité nécessite un circuit d'épuration.

13. Nommer trois paramètres en plus de la température qui sont surveillés afin de déterminer le comportement du circuit de refroidissement du blindage. Expliquer l'importance de chacun des paramètres.
14. Nommer les trois grandes mesures requises lorsque le refroidissement du bouclier d'extrémité est perdu.
15. Expliquer les trois conditions qui doivent être satisfaites avant que le circuit de refroidissement du bouclier d'extrémité puisse être remis en service.
16. En plus de l'approbation de l'organisme de réglementation, nommer trois précautions qui doivent être prises avant de drainer le bouclier d'extrémité.
17. Nommer la source de chaleur du bouclier biologique et thermique. Expliquer les conséquences néfastes de l'absence d'évacuation de cette chaleur.
18. Nommer la puissance thermique du réacteur approximative appliquée au bouclier thermique.

6 Combustible

6.1 *Comportement du combustible*

Le comportement du combustible CANDU est évalué dans les quatre domaines suivants :

- a) production de puissance maximisée par grappe et par canal
- b) production de puissance maximisée pendant une période de temps (combustion)
- c) nombre minimum de défaillances
- d) comportement dans des conditions anormales importantes.

La conception du combustible et la méthode d'exploitation d'un réacteur en particulier déterminent largement a), b) et d). On peut affirmer que les deux premières conditions sont généralement satisfaites lorsqu'il y a défaillance du combustible ou facteur critique.

Il faut également se rappeler que le combustible est utilisé dans un milieu hostile. Le CC fonctionne à des pressions élevées, à une température d'environ 300 °C et à un pH d'environ 11 dans des champs de rayonnement élevé. Les grappes de combustible peuvent passer jusqu'à dix-huit mois dans le réacteur.

Dans la pratique, l'exploitation des réacteurs CANDU au fil des années n'a pas permis de mettre en lumière que les défaillances du combustible constituent un problème important. L'introduction du combustible CANLUB et les changements dans les stratégies d'exploitation ont permis de réduire les défaillances du combustible à moins de 0,1 %. Il convient de noter que seulement un élément est habituellement défectueux dans une grappe. Ainsi, les statistiques relatives aux défauts fondées sur des éléments défectueux de combustible CANLUB baissent à 0,002 %. Cela ne signifie pas pour autant que le problème est résolu. Des efforts continus doivent être faits pour maintenir ce chiffre et, si possible le faire baisser.

Il convient également de rappeler ici que le combustible constitue la première des deux barrières contre le rejet de produits de fission (c.-à-d. le combustible céramique lui-même et la gaine de combustible). La défaillance du combustible donne inévitablement lieu au rejet de produits de fission dans le circuit caloporteur.

Dans la présente section, nous allons examiner les causes possibles des défaillances du combustible, les mécanismes visant à éviter la défaillance du combustible et les méthodes permettant de détecter et d'éliminer le combustible défectueux du réacteur pendant le fonctionnement normal. Dans la présente section, nous allons également examiner les méthodes permettant à l'opérateur de s'assurer que les limites de puissance de grappe ne sont pas dépassées et la manière dont le combustible est protégé contre l'assèchement et la fusion de l'axe du combustible.

6.1.1 Unités de combustion

Unités de combustion

Il existe trois types d'unités différentes qui sont d'usage courant pour décrire l'état du combustible. Chacune de ces unités est décrite ci-après.

Jours équivalents pleine puissance (JEPP)

C'est peut-être l'unité la plus simple pour spécifier quelle est la combustion d'une grappe de combustible donnée. Le nombre de jours équivalents pleine puissance (JEPP) indique le nombre de jours que la grappe a passé dans le cœur. Il s'agit en fait du nombre de jours d'exposition de la grappe au flux pleine puissance. (Une grappe exposée à 50 % du flux pleine puissance pendant deux jours aurait une combustion de un JEPP). Des documents pour les non-spécialistes, comme les publications destinées au grand public et les notes de service de la direction utilisent souvent cette mesure.

Énergie extraite par masse unitaire (MWh/kgU)

Chaque watt de puissance nécessite environ $3,1 \times 10^{10}$ fissions par seconde (voir Section 1.1). Un mégawatt-jour de production d'énergie thermique exige que les neutrons fissionnent environ un gramme de matière fissile. Une façon de préciser la combustion est de préciser quelle est l'énergie thermique cumulative totale extraite du combustible. L'unité utilisée est le mégawatt-heures par kilogramme d'uranium (MWh/kgU). Les experts-comptables ou les personnes participant à l'achat de combustible sont celles qui sont le plus susceptible d'utiliser cette mesure. À noter que le MWh ici est représentatif d'une énergie thermique et non électrique.

Exposition aux neutrons totaux (n/kb)

Le taux de combustion est proportionnel au flux de neutrons. La combustion accumulée pendant une période de temps spécifique (t) est par conséquent proportionnelle au produit du flux par le temps (ϕt). Ce

produit est connu comme étant l'exposition du combustible aux neutrons totaux; c'est la mesure de combustion choisie par les physiciens spécialistes des réacteurs, le responsable du chargement de combustible et d'autres spécialistes. Les unités de l'exposition aux neutrons sont :

$$\phi t \rightarrow \frac{\text{neutrons}}{\text{cm}^2 \text{s}} \times \text{s} = \text{neutrons/cm}^2$$

Les nombres de l'exposition aux neutrons totaux dans ces unités sont très grands; c'est pourquoi on remplace souvent l'unité neutron/cm² par le kilobarn, défini en remplaçant l'unité de surface par le kilobarn :

$$1 \text{ kb} = 10^3 \text{ b} = 10^3 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-21} \text{ cm}^2$$

La relation entre n/kb et n/cm² devient alors la suivante :

$$1 \text{ n/kb} = \frac{1 \text{ neutron}}{10^{-21} \text{ cm}^2} = 10^{21} \text{ neutrons/cm}^2$$

La combustion de sortie moyenne pour les grappes de combustible déchargées d'un réacteur CANDU est d'environ 1,8 n/kb. Les grappes individuelles dans le cœur à n'importe quel moment ont des expositions qui se situent entre 0 et 2 n/kb ou à peu près.

Une façon de décrire cette unité qui n'est pas très courante consiste à dire que 1 n/kb est équivalent à 10²¹ n-cm par cm³, c.-à-d. que l'exposition au flux permet de mesurer la longueur de parcours accumulée pour tous les neutrons qui ont traversé un volume unitaire de combustible pendant le séjour de ce combustible dans le cœur. La relation approximative entre ces unités de combustion est donnée par :

$$100 \text{ MWh/kgU} \approx 1 \text{ n/kb} = 10^{21} \text{ n/cm}^2 \approx 115 \text{ JEPP}$$

Les unités de l'énergie extraite ne sont pas exactement proportionnelles à l'unité d'exposition aux neutrons, car l'énergie extraite par une exposition donnée au flux est légèrement différente pour le combustible neuf et le combustible fortement irradié. La conversion entre les JEPP et les autres unités de combustion mentionnées précédemment suppose que le flux moyen du réacteur CANDU exploité à pleine puissance est de 10¹⁴ n cm⁻²s⁻¹.

6.1.2 Mécanismes de défaillance

Les sept principaux mécanismes de défaillance observés pour le combustible CANDU pendant le fonctionnement du réacteur sont les suivants :

- 1) défauts de fabrication – particulièrement en ce qui a trait à la qualité des soudures et à la qualité du métal
- 2) usure de contact et érosion dues aux débris dans le CC (particulièrement dans le cas du chargement initial du cœur)
- 3) fissuration par hydruration retardée autour des soudures du bouchon d'extrémité, ou fissuration par corrosion sous contrainte de la gaine de Zircaloy
- 4) manutention inadéquate du combustible, ce qui peut causer des contraintes mécaniques sur la gaine (dus à des morceaux de céramique arrachés, etc.)
- 5) surpuissance du combustible, c.-à-d. production de puissance trop élevée à partir d'une grappe
- 6) défaillances de rampe de puissance ou surpuissance de grappe, c.-à-d. changement rapide de la puissance du réacteur à partir de l'état en régime permanent jusqu'à un autre état. Cela est particulièrement important dans le cas des grappes qui séjournent dans le cœur depuis un certain temps
- 7) perte de refroidissement d'une grappe.

Les méthodes pouvant être utilisées pour réduire au minimum les mécanismes de défaillance du combustible sont les suivantes :

- 1) inspection minutieuse de toutes les grappes de combustible avant le chargement dans le réacteur afin d'éliminer celles qui comportent des défauts flagrants
- 2) bon entretien afin de s'assurer que des débris ne sont pas introduits dans le CC
- 3) s'assurer que tous les paramètres chimiques du CC sont rigoureusement observés

- 4) manutention adéquate de toutes les grappes de combustible, ce qui comprend la manutention des grappes neuves et la manutention du combustible neuf et épuisé par les machines de chargement de combustible
- 5) calculs adéquats pour le combustible et la physique du réacteur et fonctionnement adéquat de la machine de chargement de combustible permettant d'éviter de placer un trop grand nombre de grappes neuves dans les zones à flux élevé du cœur, etc.
- 6) réduire au minimum les changements importants et rapides de la puissance du réacteur à partir de l'état en régime permanent ou d'un autre état
- 7) surveiller l'écoulement et la température dans le canal pendant le chargement de combustible étant donné que c'est à ce moment-là que risque de survenir un blocage de l'écoulement (entraînant une perte de refroidissement des grappes). Dans des conditions d'exploitation normales, la mesure de l'écoulement est limitée par les canaux instrumentés seulement. Toutes les températures de sortie de canal sont surveillées mais, en cas d'ébullition dans un canal, la température de sortie seulement ne permet pas de déterminer s'il y a blocage de l'écoulement.

Ces procédures permettent de s'assurer que les défaillances du combustible sont réduites au minimum.

Les mécanismes de défaillance potentiels se rapportant à la perte de refroidissement et à la surpuissance des grappes sont discutés ci-après.

6.1.3 Forme du flux

Le flux dans un réacteur CANDU est aplani afin de maximiser la sortie de puissance du cœur. Il existe plusieurs techniques différentes pour faire en sorte que le flux moyen dans le cœur se rapproche le plus possible du flux maximum.

- Utilisation d'un réflecteur
- Barres de compensation
- Chargement de combustible bidirectionnel
- Combustion différentielle

- Zones liquides.

Ces méthodes, lorsqu'elles sont suivies rigoureusement, permettent d'améliorer la forme du flux général dans le cœur. Cependant, si l'on examine de près la forme du flux, on peut apercevoir de nombreux pics et creux.

6.1.4 Aspects détaillés de la forme du flux

La forme réelle du flux dans le cœur du réacteur diffère quelque peu de la forme de flux lisse global que nous venons de décrire.

L'absorption des neutrons dans le combustible et les mécanismes de contrôle de la réactivité modifient la forme de flux lisse. Pour un réacteur CANDU alimenté à l'équilibre, la forme du flux global est presque constante pendant l'exploitation, mais on peut observer des pics et des creux locaux dont la force et l'emplacement varient en raison des changements de la concentration de xénon, de la combustion du combustible et du chargement de combustible en régime de puissance, et à cause des changements de la configuration des dispositifs de contrôle de la réactivité.

Les pics du flux locaux doivent être contrôlés de manière à ce que des limites d'exploitation sûres pour la puissance de grappe et la puissance de canal ne soient pas dépassées. Les pics peuvent avoir une incidence directe sur la puissance du combustible ou ils peuvent modifier les mesures de puissance. Dans le fonctionnement courant, une bonne stratégie de chargement de combustible conjuguée à une régulation efficace de la puissance permet de limiter la présence de pics.

Tout ce qui est susceptible de produire un pic local non prévu, comme une barre restée bloquée dans le cœur, ou une oscillation du xénon non contrôlée, doit être examiné de près.

6.1.5 Dépression du flux autour des barres absorbantes

La figure 6.1 illustre une dépression du flux de neutrons thermiques de part et d'autre d'une grappe de combustible CANDU. À noter que le flux réduit s'étend au-delà de la limite de grappe. Le flux thermique juste à l'extérieur de la grappe est imputable au mouvement aléatoire des neutrons qui se déplacent dans cette région en provenance de toutes les directions.

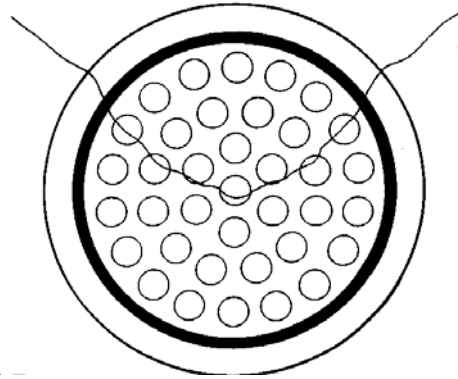


Figure 6.1

Dépression du flux thermique dans une grappe de combustible

La présence de barres absorbantes à proximité réduit la source de neutrons provenant d'une direction en particulier, alors le flux est réduit. Cet effet est observable pour toute matière absorbante dans le cœur. Le flux est non seulement réduit dans la région où les neutrons sont absorbés, mais il est réduit dans la région voisine également. La dépression du flux diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'absorbeur.

6.1.6 Pointes de puissance locales et FPPC

Le système de contrôle de zone liquide, conçu et exploité afin de réguler la puissance brute, et d'ajuster la puissance moyenne de zone, ne peut pas éliminer efficacement les points chauds locaux qui peuvent se développer pendant le fonctionnement. La forme du flux détaillé peut être modélisée en choisissant des canaux appropriés pour le chargement de combustible en marche.

Pour décrire les pics et les creux locaux dans la distribution du flux, nous pouvons comparer la distribution de flux réelle avec une forme de flux de référence idéale. La forme du flux de référence est la forme qui existerait si l'on faisait la moyenne des variations quotidiennes. (On l'appelle également forme du flux à moyenne temporelle ou forme du flux à modèle de chargement de combustible continu). Il est impossible d'atteindre cette forme théorique, car la combustion et le chargement de combustible pendant le fonctionnement normal produisent des fluctuations locales autour de la moyenne. Le responsable du chargement de combustible consulte une carte de la puissance de canal basée sur la forme de référence à titre d'objectif idéal pour le chargement de combustible.

Les écarts par rapport à la forme du flux de référence sont des variations dues au chargement de combustible. Les variations dues au chargement de combustible, définies pour chaque canal, sont le rapport

de la puissance de canal réelle (mesurée) à la puissance de canal de référence. Le programme de chargement de combustible en mode autonome permet de générer une carte des canaux de combustible du réacteur en indiquant les variations dues au chargement de combustible pour chacun d'eux.

Par exemple, si un canal en particulier a une puissance de référence de 6,5 MW (ce qui signifie que depuis plusieurs années de fonctionnement à pleine puissance, les analystes s'attendent à ce que la puissance de ce canal soit en moyenne de 6,5 MW), et que la puissance réelle est de 6,2 MW avant le rechargement de combustible, les variations dues au chargement de combustible sont de $6,2/6,5 = 0,95$ pour ce canal. Si la puissance de canal atteint une valeur d'équilibre de 6,9 MW après le rechargement de combustible, la variation due au chargement est alors de $6,9/6,5 = 1,06$. La variation due au chargement de combustible change continuellement en fonction des conditions du cœur.

Si l'on considère les variations dues au chargement de combustible pour chaque canal du cœur, il y aura une valeur qui sera la plus élevée. Cette valeur est le facteur de pointe de la puissance de canal (FPPC). Dans certaines centrales, on ne tient pas compte des variations élevées dues au chargement de combustible qui se produisent dans la rangée ou les deux rangées de canal extérieures sur le bord du cœur au moment de choisir le canal FPPC. Les centrales peuvent augmenter le FPPC mesuré en vue d'inclure les incertitudes associées aux mesures et à l'analyse.

Tous les canaux et toutes les grappes dans le cœur fonctionnent en dessous de leur limite d'exploitation sûre :

- si la puissance brute est contrôlée
- si la forme du flux global est maintenue adéquatement plane
- si le chargement de combustible permet de garder les pics locaux suffisamment bas.

Le système de régulation joue ces deux premiers rôles, en autant que le personnel d'exploitation s'assure que les niveaux de zone se situent dans leur plage de fonctionnement normal, et qu'il n'y a pas de distorsions du flux à cause de configurations inhabituelles des mécanismes de contrôle de la réactivité. Les systèmes d'arrêt d'urgence servent de systèmes de secours pour la régulation normale. Dans un chapitre ultérieur, nous allons examiner la protection régionale contre

la surpression (ROP), parfois appelée système de protection contre la surpuissance neutronique (NOP).

Le troisième point de la liste dépend du choix et du chargement de combustible des bons canaux. (Le chargement de combustible a également une incidence sur le deuxième point de la liste). Maintenant, nous allons décrire comment le responsable du chargement de combustible choisit les canaux au moment du chargement.

6.1.7 Surchauffe du combustible

La fusion de l'axe du combustible peut causer une dilatation des pastilles, ce qui entraîne des contraintes et des défaillances de la gaine de combustible. La température de l'axe des éléments de combustible, qui constitue notre principale préoccupation, dépend de deux facteurs :

- 1) la quantité de chaleur produite dans le combustible
- 2) la capacité d'évacuer la chaleur du combustible.

Cela pourrait nécessiter des différences de température excessivement grandes (entre les éléments combustible et le caloporteur), afin de transférer la chaleur générée. Cela pourrait causer une surchauffe du combustible ou de la gaine.

Rappelons-nous que le matériau composant le combustible, le UO_2 , a une très faible conductivité thermique et que même dans des conditions d'exploitation normales, avec une température de gaine de combustible inférieure à 300 °C, la température de l'axe des grappes de combustible s'approchera de 2000 °C. La température de fusion approximative du UO_2 est ~2800 °C. Les pratiques d'exploitation normales doivent permettre de s'assurer que la température du combustible qui pourrait causer des défaillances du combustible est évitée.

La qualité de l'évacuation de la chaleur peut être vérifiée par les moyens suivants :

- 1) mesure de l'écoulement – canaux entièrement instrumentés (FINCH) et nombre adéquat de pompes CC en service (également ΔP surveillée durant le chargement de combustible)

- 2) mesures de la température lorsque cela est utile (à l'entrée des canaux en tout temps et à la sortie des canaux lorsque le canal est sans ébullition (faible puissance))
- 3) mesures de la pression dans le CC
- 4) mesures de la puissance thermique, soit par les canaux entièrement instrumentés (FINCH) ou mesures du côté secondaire. La puissance thermique du réacteur peut être calculée à l'aide des écoulements FINCH et des températures (qui sont représentatives du cœur). En utilisant différents écoulements et températures du côté secondaire, la puissance thermique du réacteur peut être calculée.

Dans un mode de convection forcée, à mesure que le caloporteur passe de l'état sous-refroidi jusqu'à des conditions d'ébullition pelliculaire, les conditions de transfert thermique changent considérablement.

Examinons le comportement du transfert de chaleur dans un canal lorsque la puissance de réacteur augmente (et par conséquent la température du combustible augmente elle aussi). Il y aura une augmentation initiale du transfert de chaleur lorsque l'ébullition initiale commence. À mesure que l'ébullition devient plus importante, des couches de vapeur se forment progressivement (ébullition pelliculaire ou assèchement) et le transfert de chaleur diminue. Cette réduction commence lorsque les conditions du flux de chaleur critique (FCC) sont dépassées (même légèrement). Le flux de chaleur maximum pouvant être éliminé par l'ébullition pelliculaire porte le nom de flux de chaleur critique (FCC). La puissance de canal à laquelle les conditions de flux de chaleur critique sont satisfaites porte le nom de puissance de canal critique (PCC). À noter que les conditions de FCC peuvent être établies même en dessous de la PCC définie précédemment (pour une forme de flux normal) si la forme du flux s'éloigne de la forme normale. Des changements dans les conditions thermohydrauliques et dans la forme du flux donneront lieu à une nouvelle puissance de canal critique pour ce canal.

Nous faisons fonctionner les réacteurs de manière à ce que le flux de chaleur critique ne soit pas atteint dans des conditions d'exploitation normales. S'il y a formation d'une couverture de vapeur (ébullition pelliculaire), le transfert de chaleur se fera principalement par conduction et par rayonnement de part et d'autre du film et les températures du combustible augmenteront considérablement (d'une centaine de degrés). Il est alors fort probable qu'une défaillance du

combustible survienne. Le vidage des canaux augmente la réactivité et ajoute au problème.

La surpuissance produira certainement des températures excessivement élevées de l'axe du combustible. Cela pourrait éventuellement causer une fusion de l'axe et une dilatation des pastilles, avec une probabilité élevée de défaillance de la gaine. La surpuissance brute pourrait causer des dommages au tube de force à cause du désassemblage des grappes de combustible (déformation).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, une combinaison de puissance produite et de conditions de caloporteur peuvent causer une surchauffe du combustible.

Avec un profil de flux de neutrons à pleine puissance standard, mais avec un écoulement massique de caloporteur réduit dans les canaux, l'ébullition peut se produire plus près de l'entrée (pour un canal qui est déjà en ébullition). Les grappes à la sortie du canal pourraient être sujettes à des conditions d'assèchement et une surchauffe finale des grappes est possible. Cependant, les grappes sujettes à la surchauffe ne sont pas celles qui sont assujetties aux conditions de flux neutronique maximum.

Des résultats semblables pourraient être causés par une augmentation des niveaux du flux de neutrons alors que l'écoulement de caloporteur demeure inchangé (surchauffe suivant la surpuissance).

Des effets semblables peuvent survenir pour un profil de flux oblique ou non standard. Par exemple, supposons que le profil du flux est oblique vers la sortie du canal, c.-à-d. où le flux est élevé, étant donné que la production de puissance est plus élevée à la sortie du canal. À mesure que le caloporteur s'écoule dans le canal, il devient plus chaud à force d'accumuler la chaleur des grappes de combustible et la marge d'ébullition diminue. À mesure que ce caloporteur (avec une faible marge d'ébullition) passe au-dessus des grappes à puissance élevée à la sortie du canal, l'ébullition pelliculaire se produit à cause des températures élevées des grappes (ces grappes seront beaucoup plus chaudes qu'une grappe normale en raison de la forme du flux). Cela peut causer une surchauffe des grappes de combustible, avec une probabilité plus élevée de défaillances du combustible.

Étant donné que l'écoulement dans les canaux adjacents se fait dans une direction opposée, la forme de flux oblique décrite précédemment produirait un flux plus élevé à l'entrée de ces canaux. À noter que l'on suppose que tous les autres canaux sont dans des conditions

semblables au canal mentionné dans le paragraphe précédent, et que la même quantité de chaleur est produite dans ces deux canaux.

Cependant, dans le second cas, le caloporteur passe au-dessus des grappes à puissance élevée (chaudes) avec une marge beaucoup plus grande d'ébullition, étant donné qu'elles se trouvent à l'entrée du canal. Ces grappes seront refroidies sans qu'il y ait d'ébullition. Les grappes à la sortie du canal, qui sont plus froides (ces grappes seront plus froides que les grappes normales en raison du flux incliné à la sortie du canal), seront refroidies adéquatement sans assèchement dans le canal.

6.1.8 Limites de puissance

Les températures de fusion de l'axe du combustible doivent être limitées, mais ce n'est pas un paramètre pouvant être mesuré dans nos réacteurs. Le problème est compliqué par le fait que le flux de neutrons dans le réacteur varie selon les directions axiales et radiales. Même à l'intérieur de la grappe de combustible, il y a une variation du flux de neutrons thermiques (illustré à la fig. 6.2). Cette dépression du flux est causée par les éléments de combustible extérieurs qui absorbent des neutrons thermiques du modérateur avoisinant. Ainsi, de moins en moins de neutrons sont disponibles pour les éléments de combustible intermédiaires et intérieurs.

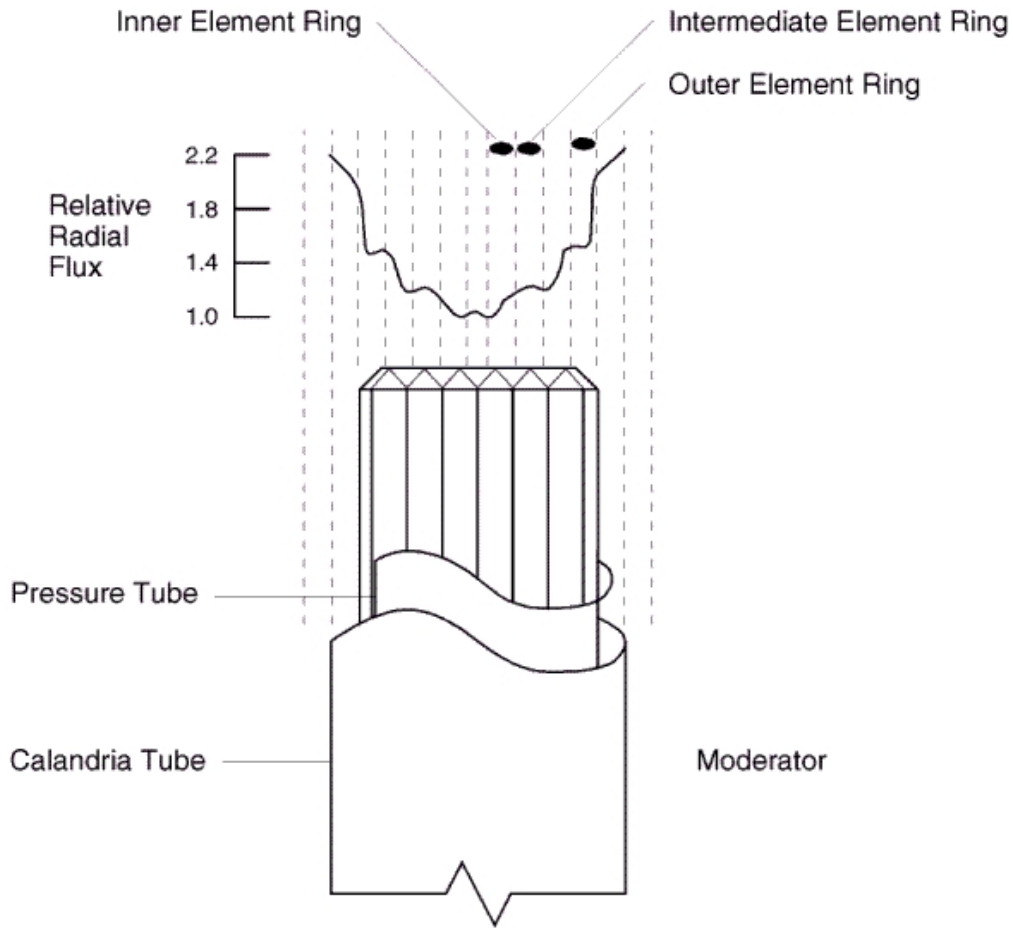


Figure 6.2 – Dépression du flux de neutrons thermiques dans une grappe de combustible

Inner Element Ring	Anneau de l'élément intérieur
Intermediate Element Ring	Anneau de l'élément intermédiaire
Outer Element Ring	Anneau de l'élément extérieur
Relative Radial Flux	Flux radial relatif
Pressure Tube	Tube de force
Calandria Tube	Tube de calandre
Moderator	Modérateur
2.2 1.8 1.4 1.0	2,2 1,8 1,4 1,0

Le fait de tenir compte de ces facteurs, à l'étape de la conception, permet de déterminer une limite supérieure à laquelle la défaillance du combustible demeurera improbable. La limite de la puissance de grappe maximale doit se trouver en dessous de la puissance requise pour causer une défaillance du combustible.

Le permis de la centrale contient les valeurs limites pour les grappes de combustible, les canaux de combustible, la puissance du réacteur et l'écoulement de caloporteur. Les *Lignes de conduite pour l'exploitation* doivent permettre de s'assurer que ces chiffres ne sont pas dépassés habituellement de sorte que les défaillances du combustible et que le rejet consécutif de produits de fission seront limités.

Dans la plupart des centrales, des limites quant à la puissance de grappe et de canal sont spécifiées pour s'assurer que les grappes ne subissent pas de surpuissance dans les conditions d'exploitation normales ou durant les transitoires.

Le simple fait de limiter la puissance de canal ne suffit pas pour s'assurer qu'il n'y a aucune surpuissance de grappe de combustible. Cela s'explique par le fait que le flux peut être dévié de sa forme originale.

Par exemple, dans des conditions d'exploitation normales, la puissance de grappe peut être limitée par la limite de puissance de canal (c.-à-d. la puissance de canal, le nombre de grappes et la distribution du flux normal pris en compte, la grappe produira des puissances inférieures à la limite indiquée dans le permis pour s'assurer que la puissance de canal n'est pas dépassée).

Maintenant, supposons qu'il y a une inclinaison du flux à cause d'un transitoire du Xe. Cela peut donner lieu à une concentration de la puissance à la sortie des canaux. En fait, il est possible qu'une grappe en particulier voit sa limite de puissance dépassée alors que la limite de puissance pour le canal ne l'est pas.

À noter qu'à mesure que la combustion de la grappe augmente, la puissance maximale pouvant être supportée avant une défaillance est moindre. Cela s'explique par le fait que la fragilisation de la gaine augmente, de même que les contraintes mécaniques, principalement à cause de l'accumulation interne de produits de fission gazeux. Nous faisons fonctionner nos réacteurs de manière à ce que les grappes à fort taux de combustion ne soient pas assujetties à des puissances élevées, ce qui réduit par conséquent ce type de défaillance de combustible.

6.1.9 Protection contre l'assèchement

6.2 Protection contre la puissance élevée

Nous allons examiner la protection contre la puissance élevée sous les deux rapports suivants :

- Protection régionale contre la surpression (ROP)
- Limites de permis se rapportant à la puissance de grappe et à la puissance de canal

6.2.1 Accroissement de puissance limité par les systèmes NOP/ROP

Les systèmes ROP (un dans chaque système d'arrêt) fournissent les paramètres de déclenchement primaire ou secondaire pour différentes défaillances de procédés qui causent une puissance élevée excessive. Le système vise principalement les augmentations de puissance qui sont trop lentes à produire un arrêt à cause du taux-log.

Chaque système ROP comprend trois réseaux de détecteurs autonomes dans le cœur qui sont liés à trois canaux d'arrêt. Pour une protection adéquate, au moins un détecteur dans chaque canal doit détecter tout événement qui produit une puissance brute élevée ou une puissance locale élevée. Plus particulièrement, les valeurs seuil d'arrêt permettent de s'assurer qu'un arrêt du réacteur se produit avant que la production de chaleur entraîne soit une fusion de l'axe du combustible ou un assèchement ailleurs dans le cœur.

La fusion de l'axe du combustible se produit lorsque le taux de production de chaleur dans un élément de combustible dépasse la capacité des pastilles à transférer la chaleur à la gaine de combustible et au caloporteur, alors la température de l'axe atteint la température de fusion du UO_2 (environ 2750 °C). L'assèchement du combustible se produit lorsque la température de la gaine atteint un niveau tellement élevé que l'ébullition excessive du caloporteur à la surface du combustible produit une couverture de vapeur qui limite l'évacuation de la chaleur hors de l'élément de combustible.

Il en résulte un assèchement et un réchauffement rapide du combustible suivi de la fusion de l'axe. Habituellement, la fusion de l'axe du combustible se produit lorsque la puissance de grappe est trop élevée (en raison d'un flux local élevé) et l'assèchement se produit lorsque la puissance de canal est trop élevée (à cause d'une sortie de puissance totale élevée le long des canaux). L'analyse démontre une protection contre ces deux phénomènes.

Les concepteurs du système ne peuvent pas connaître la puissance initiale de chaque canal, car celle-ci varie quotidiennement en raison de la combustion et du rechargement de combustible. Le concepteur ne connaît pas non plus la configuration du réacteur au moment d'un événement en particulier qui nécessite un arrêt. Enfin, le concepteur doit assurer la protection contre une grande diversité d'événements déclencheurs. Dans l'analyse, un arrêt se produit lorsque la puissance de canal, initialement à la puissance de canal de référence, atteint la puissance d'assèchement (ou lorsque toutes les grappes atteignent la température de fusion de l'axe du combustible). La protection contre un accroissement de puissance dans un cœur réel (c.-à-d. dans un réacteur) où surviennent des variations dues au chargement de combustible en raison du fait que les signaux du détecteur ROP sont plus élevés (après étalonnage) en vue de protéger le canal où les variations sont les plus importantes.

Pour expliquer comment les valeurs seuil du déclenchement sont déterminées et comment les paramètres de couverture en sont affectés, voici trois éléments que nous allons examiner.

- Ensemble des formes de flux de référence
- Détermination des arrêts requis pour la forme de flux de référence
- Prise en compte des variations dues au chargement de combustible (FPPC)

6.2.2 Ensemble des formes de flux de référence

L'analyse des paramètres de couverture tient compte d'un très grand nombre d'événements à partir de différentes configurations de réacteur initiales, c.-à-d. au moins plusieurs centaines de scénarios. Ce sont des événements comme la perte de contrôle de la puissance brute, qui produit une augmentation lente mais uniforme de la puissance dans le cœur, ou qui draine une zone unique, ce qui cause une augmentation de la puissance brute avec un pic local élevé superposé, etc. Ces conditions et de nombreuses autres conditions sont combinées avec différentes distorsions initiales des conditions du cœur dans la forme du flux de référence (p. ex. le cœur de référence en régime permanent à puissance élevée, le cœur de référence avec un transitoire du xénon, le cœur de référence avec une barre coincée dans le cœur, etc.). Le système ROP doit assurer une protection contre la surpuissance pour un grand nombre de formes du flux initial qui pourrait survenir suite au mouvement normal ou anormal des dispositifs de contrôle de la réactivité, en plus de changements dans la concentration de xénon.

L'ensemble des formes de flux nominal est un ensemble complet des formes du flux représentant chacun des événements analysés.

6.2.3 Paramètres de couverture du cœur de référence

Chaque détecteur doit avoir une valeur seuil de déclenchement tel qu'au moins un détecteur dans chaque réseau s'arrêtera avant l'assèchement d'un canal de combustible, ou avant le début de la fusion de l'axe du combustible, soit l'événement qui se produit le premier. La notion est fort simple. Une simulation informatisée commence en présentant le réacteur dans la forme du flux de référence et simule chacun des événements analysés tour à tour. Cela permet à chaque forme du flux de référence d'augmenter jusqu'à ce que la puissance de canal la plus élevée atteigne le niveau de puissance correspondant au début de l'assèchement (ou la puissance de grappe la plus élevée correspondant à la température de fusion de l'axe). L'ordinateur note alors le niveau de flux thermique pour tous les emplacements de détecteur dans le cœur.

À mesure que l'ordinateur analyse chacune des formes du flux de référence, il trie les lectures des détecteurs et choisit les valeurs seuil de déclenchement les moins restrictives (en tenant compte de la marge de déclenchement) qui fournit les paramètres de couverture nécessaires.

À mesure que des accidents de plus en plus restrictifs sont analysés, les valeurs seuil du déclenchement pour tous les détecteurs sont abaissés, peut-être dans la plage de 117 % à 119 %. Aux premières étapes de la conception, les ajustements des emplacements des détecteurs et de leur répartition dans les réseaux améliorent les paramètres de déclenchement tout en optimisant la marge de fonctionnement (marge de déclenchement). L'analyste peut même apporter de petits changements à la forme du flux de référence (en rendant la forme du flux de référence légèrement différente par rapport à la forme du flux à moyenne temporelle). À la fin du procédé, chaque système ROP possède un ensemble de valeurs seuil de déclenchement qui assure la couverture complète de tous les incidents dans l'ensemble de référence, en autant que le chargement de combustible du réacteur ait produit la forme du flux de référence.

6.2.4 Effet des variations dues au chargement de combustible

Les valeurs seuil du déclenchement ROP/NOP protègent le cœur de référence idéal, que nous venons de décrire. Dans le cœur réel, les variations dues au chargement de combustible peuvent donner lieu à une puissance plus élevée dans le canal vulnérable (pour une condition

particulière) que dans le cœur de référence. La lecture du détecteur qui devrait assurer les paramètres de couverture pourrait être inférieure à la valeur de référence. À mesure que la puissance augmente uniformément, le canal vulnérable atteint la température d'assèchement (ou une grappe atteint la température de fusion de l'axe) avant que le détecteur atteigne sa valeur de déclenchement. Le pire scénario serait que le canal vulnérable corresponde au canal FPPC (le canal FPPC possède la variation due au chargement de combustible la plus élevée du cœur). Cette difficulté est résolue en reconnaissant que les lectures des détecteurs réels ne sont pas importantes, seulement la marge de déclenchement compte. Les détecteurs ROP des systèmes de sûreté n'ont pas à indiquer 100 % lorsque le réacteur est à pleine puissance. Plus tôt, tous les détecteurs sont ajustés de manière à avoir une lecture de $100 \% \times \text{FPPC}$ (si le réacteur est à 100 % de la pleine puissance). Le fait de régler la lecture à 100 % atténue le fait que certaines lectures de détecteur sont faibles en raison des variations dues au chargement de combustible. Le fait d'augmenter ces lectures par le FPPC préserve la marge de déclenchement pour le pire scénario. Des arrêts se produiront assez tôt si le canal vulnérable n'est pas le canal FPPC.

Un chargement de combustible inadéquat peut produire un FPPC élevé qui donnera lieu à une petite marge de déclenchement. Lorsque cela se produit, les arrêts du NOP peuvent sembler très restrictifs, avec une puissance ne permettant aucun assèchement ni aucune fusion de l'axe du combustible. Il faut garder à l'esprit que lors de certains accidents de perte de régulation lente, il y a un canal qui pourrait atteindre l'assèchement lorsque la valeur seuil du déclenchement est atteinte.

Si les variations dues au chargement de combustible dans le canal sont supérieures au FPPC en raison d'une certaine distorsion du flux local résultant d'une configuration des dispositifs non prévus (peut-être aggravés par les effets du xénon) et imputables, par exemple, au fait qu'une barre d'arrêt partiellement insérée dans le cœur est bloquée, les paramètres de couverture ne seront peut-être pas adéquats. L'ensemble de référence peut inclure certaines de ces configurations de dispositifs hautement improbables qui donnent des formes du flux extrêmes. Si ces configurations nécessitent des réglages du déclenchement qui sont trop restrictifs pour le fonctionnement normal, elles sont protégées par un commutateur à main qui réduit les valeurs seuil de déclenchement. (L'opérateur doit reconnaître que la configuration est anormale, réduire la puissance de manière appropriée et ajuster le commutateur à main).

Il est inévitable que de nombreuses configurations des dispositifs de contrôle de la réactivité ne seront pas incluses dans l'ensemble de

référence. Un autre réglage du commutateur à main qui réduit les valeurs seuil de déclenchement protège également les formes du flux connexes, les formes du flux non analysées. Les analystes s'assurent que cette valeur seuil du déclenchement assurent la protection d'un petit ensemble limitatif de formes du flux extrêmes, qui ne sont pas associées à un événement en particulier.

Nous allons terminer cette section en faisant un commentaire final concernant les paramètres de couverture. Les réacteurs CANDU à 37 éléments atteignent des conditions d'assèchement avant que toute grappe contenue dans le cœur atteigne la température de fusion de l'axe du combustible. Les éléments de combustible les plus minces (comparativement aux grappes à 28 éléments) fournissent une surface totale plus grande pour le refroidissement et une épaisseur moindre de dioxyde d'uranium (le UO_2 est un piètre conducteur de chaleur). Les réacteurs CANDU qui utilisent des grappes de 28 éléments de combustible risquent davantage d'atteindre des températures de fusion de l'axe du combustible avant qu'un canal atteigne la puissance d'assèchement. Les réacteurs utilisant des grappes à 37 éléments sont décrits comme étant à puissance de canal limitée, et les réacteurs utilisant des grappes à 28 éléments sont considérés comme étant à puissance de grappe limitée.

6.2.5 Limites du permis

Un ajout important de renseignements à la section précédente est que les systèmes ROP/NOP ne permettent pas d'éviter que les limites de permis soient dépassées pour la puissance de grappe et de canal. par exemple, une limite courante de permis pour la puissance de canal dans le cas d'une grappe à 37 éléments de combustible est de 7,1 MW. La puissance de canal qui produira l'assèchement, en supposant que les conditions de caloporteur sont normales, est plus élevée de presque 30 %. Évidemment, dans cet exemple, un arrêt visant à éviter l'assèchement n'empêchera pas nécessairement la puissance d'augmenter au-delà de la limite de permis.

Le déclenchement des systèmes ROP/NOP permet d'assurer l'intégrité du canal de combustible en réduisant la puissance avant qu'il y ait un risque de désassemblage du combustible qui pourrait poser problème au canal. Un circuit caloporteur intact garantit que les produits de fission rejetés dans le caloporteur n'atteindront pas le public. Les limites précisées dans le permis concernant la puissance de grappe et la puissance de canal sont fixées pour des raisons différentes. L'analyse de sûreté démontre que le rejet de rayonnement vers le public se situe à l'intérieur des limites précisées, et illustre des

paramètres de couverture primaire et secondaire adéquats pour différents événements. L'analyse dépend de la puissance du combustible avant l'événement analysé. On n'a pas démontré que les paramètres de déclenchement et que la protection du public étaient adéquats lorsque les conditions avec une puissance de combustible qui dépasse les valeurs supposées dans l'analyse; ces valeurs établissent les limites du permis.

Le fonctionnement avec une puissance de grappe ou de canal dépassant les limites précisées dans le permis est en fonctionnement avec une puissance excessivement élevée. La mise en application de ces limites précisées dans le permis nécessite les efforts conjoints du responsable du chargement de combustible, de l'équipe de chargement et du personnel autorisé. Le responsable du chargement du combustible vérifie régulièrement l'évolution lente des puissances de grappe et de canal en régime permanent dans le programme de chargement du combustible autonome. Le programme aide à choisir les canaux pour le chargement de combustible afin d'assurer une marge adéquate par rapport aux limites de permis dans le fonctionnement normal.

Comment le personnel autorisé sait-il qu'une limite de permis n'a pas été respectée? Il n'y a pas de mesure directe ou d'indication sur un panneau, alors l'opérateur ne le sait pas à moins que le responsable du chargement de combustible lui ait dit. Cependant, si la puissance brute de production électrique est inférieure à la limite du permis et si le flux est suffisamment plat et que le responsable et l'équipe de chargement de combustible ont mis les grappes au bon endroit, alors la puissance des grappes et de canal se situera à l'intérieur des limites.

Cela signifie que la surveillance courante des positions des dispositifs et des niveaux de zone fait partie du processus d'application des limites de permis pour ce qui est de la puissance de grappe et de canal. Inversement, si la forme du flux n'est pas standard (avec une inclinaison inhabituelle – p. ex. lorsqu'il y a limitation de zones, ou que des barres sont coincées dans le cœur ou qu'une certaine combinaison de barres donne une configuration différente de la normale) alors l'opérateur n'a pas d'autre choix que de supposer que les limites de puissance de canal (ou les limites de puissance de grappe) peuvent avoir été dépassées, à moins que l'analyse de la configuration particulière démontre qu'il en est autrement.

6.2.6 Surveillance de la puissance de grappe

Les puissances de grappe et de combustible individuel ne sont pas mesurées. Pour s'assurer que les grappes fonctionnent à l'intérieur de leurs limites de puissance (et par conséquent, bien en-deçà des limites de température de l'axe du combustible) à tous les emplacements où il y a des grappes, nous devons surveiller un paramètre qui est mesurable – la puissance de canal. C'est la somme des puissances thermiques produites par toutes les grappes de combustible individuel dans un canal.

La technique de mesure réelle utilisée pour déterminer la puissance de canal varie selon qu'il y a ou non ébullition dans les canaux.

Pour un canal sans ébullition

puissance de canal = ΔT canal x écoulement canal x capacité thermique spécifique du D₂O du CC

Un profil de flux suffisamment plat doit également être assuré afin d'éviter que les limites de puissance de grappe ne soient dépassées.

Pour un canal avec ébullition

ΔT n'est plus valide une fois que l'ébullition a débuté (parce qu'elle demeure constante tant qu'il y a du liquide dans le canal). Dans ce cas, il est nécessaire de tenir compte de la contribution de la vapeur à la sortie du canal soit :

- a) en effectuant des mesures de l'écoulement d'entrée et de sortie, pour un nombre limité de canaux (FINCH). Une comparaison des débits volumétriques d'entrée et de sortie qui détermine la proportion de vapeur et par conséquent l'enthalpie à la sortie (c.-à-d. le volume de l'écoulement de sortie doit être plus grand que le volume d'écoulement d'entrée parce que la vapeur occupe plus d'espace que l'eau). Un profil de flux suffisamment plat doit également être assuré afin d'éviter que la puissance de grappe ne soit dépassée. À noter qu'une fois que la forme du flux est connue, des prévisions de la puissance de canal et de la qualité du caloporteur de sortie dans les canaux autres que les FINCH peuvent être faites (à l'aide d'un logiciel).
- b) i) À puissance élevée

En mesurant la puissance thermique et en s'assurant qu'un profil de flux suffisamment plat est obtenu. La puissance des canaux individuels et des grappes peut être déterminée (encore à l'aide d'un logiciel). Ainsi, on peut mesurer la puissance pour s'assurer que les limites de puissance de canal et de grappe ne sont pas dépassées.

ii) À faible puissance (sans ébullition)

En utilisant des mesures de ΔT de part et d'autre du réacteur, et en s'assurant que le profil du flux est suffisamment plat.

Dans tous ces cas, on suppose que la forme du flux est normale (plane). De façon générale, le système de contrôle de zone liquide contrôle la forme du flux dans des limites admissibles, en autant que les zones liquides ne sortent pas de leur plage de contrôle (le contrôle de zone individuelle est réparti pour s'assurer qu'il y a un bon contrôle de la puissance brute).

Des simulations informatisées autonomes sont utilisées au besoin pour déterminer les formes du flux précises et pour s'assurer que les limites de permis ne sont pas dépassées.

Par conséquent, notre principale préoccupation est d'éviter que l'on atteigne la puissance de canal critique, c.-à-d. l'assèchement du canal de combustible.

Nous pouvons respecter notre critère de réacteur sans ébullition en s'assurant que dans toutes les formes de flux de neutrons analysées, les débits massiques et les pressions du CC, les températures de sortie demeurent en-deçà de la saturation en tout temps. Réduire la puissance d'un réacteur peut permettre d'assurer la protection au cas où la température de sortie atteindrait la température de saturation. Des arrêts des systèmes de sûreté distincts dus au neutron permettront de s'assurer que les distorsions de la forme du flux ne causeront pas de surpuissance de grappe.

Afin d'éviter l'assèchement dans le réacteur en ébullition, nous nous assurons que les formes du flux sont connues et que la puissance de canal est surveillée à l'aide de l'écoulement de canal (dans un nombre de canaux représentatifs) et des mesures de la puissance brute.

Des excursions locales du flux à court terme seront indiquées et corrigées par les mécanismes SRR (zones, barres de compensation, etc.). Cela permet d'éviter que l'opérateur, par une combinaison de conception et de procédures (philosophie de défense en profondeur), n'introduise des changements soudains et marqués dans les profils de flux neutronique.

6.2.7 Notions principales

- Les sept facteurs qui contribuent à la majorité des défaillances du combustible sont les défauts de fabrication, l'usure de contact et l'érosion, la fissuration par corrosion sous contrainte et la fissuration par hydruration, la manutention inadéquate du combustible, la surpuissance, et la perte de refroidissement suffisant.
- Ces mécanismes de défaillance du combustible peuvent être réduits au minimum par des inspections minutieuses des grappes de combustible avant l'utilisation, un bon entretien dans l'ensemble du CC, l'application de tous les paramètres chimiques du CC, la manutention adéquate du combustible neuf et du combustible épuisé, les opérations de chargement de combustible adéquates, les changements de puissance du réacteur modérée et la surveillance de l'écoulement et de la température au moment du chargement de combustible.
- Il y a des limites de puissance pouvant être extraites d'une grappe ou d'un canal afin d'éviter la surpuissance, c.-à-d. d'éviter que des défaillances du combustible se produisent suite à une surchauffe. Ces deux limites sont requises pour éviter la surpuissance/surchauffe pendant le fonctionnement avec des formes du flux normales et anormales.
- Une surpuissance du combustible ou un refroidissement inadéquat peuvent entraîner des températures de combustible élevées.

Les renseignements disponibles pour l'opérateur, afin de s'assurer qu'il n'y a pas de surpuissance de grappe, sont les suivants :

- Pour un réacteur sans ébullition, en utilisant les températures de sortie des canaux afin de mesurer la puissance de canal et de s'assurer que le profil du flux est raisonnablement plat.

- Pour un réacteur avec ébullition à puissance élevée, en utilisant les écoulements de canal pour un nombre de canaux représentatifs, à l'aide des mesures de la puissance brute, et s'assurer que le profil du flux est raisonnablement plat.
- Utilisation des températures de sortie des canaux pour mesurer la puissance de canal et pour s'assurer qu'un profil de flux raisonnablement plat est obtenu (pour un réacteur avec ébullition à faible puissance : fonctionnement sans ébullition).

6.2.8 Détection et détermination de l'emplacement du combustible défectueux

Le combustible défectueux libère inévitablement des produits de fission (PF) dans le circuit caloporteur. Les deux premières barrières contre le rejet de produits de fission auront subi une brèche.

Il est important de détecter et de déterminer l'emplacement du combustible défectueux et de l'enlever du réacteur le plus rapidement possible pour les raisons suivantes :

- a) le combustible défectueux libérera, particulièrement lors des manœuvres de puissance, de grandes quantités de PF dans le caloporteur. Cela augmentera les niveaux de rayonnement pour le personnel de centrale et éventuellement pour le grand public en cas de rejet. Cela rendra également la détection et la détermination de l'emplacement du combustible défectueux plus difficiles en raison de l'effet de masque ainsi créé.
- b) À noter que pour la raison précédente, il y a une limite d'arrêt pour le I^{131} dans le CC. L'arrêt du réacteur donnera lieu à une perte de production de puissance.
- c) En outre, le fait de laisser du combustible défectueux dans le réacteur pourrait aggraver la situation. Le blocage des canaux et les dommages causés au tube de force pendant le déchargement de combustible pourraient éventuellement donner lieu à des grappes de combustible distordues/désassemblées. Les débris dans le CC pourraient contribuer à d'autres défaillances de combustible.

La surveillance continue et individuelle de toutes les grappes de combustible ou des canaux de combustible en vue de déterminer et de

localiser les défaillances n'est pas effectuée actuellement dans aucune centrale CANDU.

La méthode habituelle consiste à détecter d'abord la présence d'un élément de combustible défectueux se trouvant dans le réacteur et de le localiser.

Il existe différentes méthodes, qui ont été utilisées au fil des ans, pour détecter le combustible défectueux. Certaines de ces méthodes s'avèrent plus efficaces que d'autres. Toutes les méthodes employées à ce jour cependant possèdent une caractéristique commune, c.-à-d. qu'elles mesurent les rayons gamma ou les neutrons émis par les produits de fission (PF).

Ces méthodes de détection et de localisation varient d'une centrale à l'autre, mais nous allons en voir une description générale.

6.2.9 Détection du combustible défectueux

Une analyse d'échantillon de D₂O du CC à l'aide de détecteurs γ haute résolution est effectuée.

Cette analyse permet de détecter l'activité brute ainsi que les énergies γ spécifiques de différents isotopes (cela est expliqué plus loin). Cette méthode porte le nom de surveillance des produits de fission gazeux (PFG). Cette méthode est autonome et permet de détecter les gaz radioactifs rejetés par le combustible. La méthode permet de détecter la présence de combustible défectueux seulement. On peut également prélever des échantillons et les analyser en laboratoire au cas où le système PFG ne serait pas disponible.

6.2.10 Détermination de l'emplacement du combustible défectueux

Il existe différentes méthodes qui sont utilisées pour localiser le combustible défectueux, mais seulement deux d'entre elles demeurent d'usage courant.

- a) Balayage des collecteurs/conduites d'alimentation de sortie.

Les matières solides des produits de fission, également connues sous le nom de produits de fission déposés (PFD) seront rejetées par le combustible défectueux. De façon générale, les PFD ont une circulation limitée et tendent à se déposer sur la gaine, les conduites d'alimentation, les collecteurs, etc. en aval de l'emplacement où est survenue la défaillance. Des détecteurs gamma placés dans la boîte des conduites d'alimentation

permettent de balayer les conduites d'alimentation de sortie de chaque canal.

Une radioactivité élevée pour une conduite d'alimentation de sortie d'un canal donné peut indiquer la présence de combustible défectueux dans ce canal. Ainsi, cette méthode peut être utilisée pour localiser les canaux qui contiennent du combustible défectueux.

b) Détection des neutrons retardés.

En présence de combustible défectueux, ayant été détecté par le système de détection du combustible défectueux, les conduites d'échantillonnage à la sortie de chaque canal peuvent être balayées en vue de détecter la présence de neutrons retardés. Ces lignes d'échantillonnage sont suffisamment longues pour permettre la désintégration des rayons γ et des photoneutrons en vue de réduire les niveaux du rayonnement de fond lus par les détecteurs de neutrons. Ainsi, la présence de neutrons de désintégration des produits de fission dans une conduite d'échantillonnage indique qu'il y a du combustible défectueux dans ce canal.

La détection et la détermination de l'emplacement sont compliquées par le fait que le CC contient toujours une certaine quantité de produits de fission en raison du dépôt des PF imputables au combustible défectueux antérieur, et peut-être à la présence de quantités trace d'uranium sur les surfaces externes des éléments (qui se sont déposées lors de la fabrication du combustible). En outre, il peut y avoir un inventaire de produits de corrosion devenus radioactifs suite au passage des impuretés dans le réacteur.

De tous les produits de fission produits dans le combustible, quels sont les radionucléides qui devraient être choisis pour compléter au mieux les instruments de détection disponibles?

Dans le cas de la détection du combustible défectueux, les radionucléides choisis pour la détection doivent être ceux qui ont le plus grand rendement de désintégration possible (production) et devraient être suffisamment volatils pour s'échapper facilement du combustible défectueux (comme les gaz rares). Étant donné que ces gaz ne sont pas éliminés par le circuit d'épuration, cela donne une meilleure sensibilité au système de surveillance basé sur les gaz rares. La période radioactive doit être telle qu'une valeur d'équilibre (4 à 5 périodes radioactives) peut être atteinte dans le CC pendant une

période de temps raisonnable (en jours). Cela permet aux quantités détectables de s'accumuler, même suite à une petite fuite.

En outre, dans la pratique, cela encourage davantage le système à détecter les rayons gamma plutôt que les neutrons (étant donné que les neutrons ont un rendement de désintégration plus faible).

Pour déterminer l'emplacement à l'aide des neutrons retardés, des émetteurs de neutrons retardés volatils sont observés. Une période légèrement plus longue que le temps de désintégration utilisé pour les conduites d'échantillonnage (pour la désintégration du N^{16} et du O^{19}) est souhaitable. La période courte permet de s'assurer que le signal provenant du canal contenant le combustible défectueux sera plus élevé que les signaux provenant d'autres canaux, étant donné que les isotopes se désintégreront avant d'avoir été dispersés dans le cœur.

Pour déterminer l'emplacement à l'aide des produits de fission déposés, les PFD doivent se déposer rapidement sur la conduite d'alimentation avant de se disperser dans le CC. Lorsque la période radioactive est plus longue, il pourrait y avoir accumulation de radioactivité sur les conduites d'alimentation de sortie. Le principal inconvénient de ce système est que les PFD ne s'échappent pas facilement du combustible.

Cela permet d'obtenir la conclusion suivante :

Période radioactive courte (<1 minute) étant la plus adéquate pour déterminer l'emplacement du combustible défectueux.

Période radioactive plus longue (heures-jours) étant la plus adéquate pour détecter le combustible défectueux.

Les centrales CANDU les plus récentes utilisent des systèmes qui surveillent :

- 1) les énergies γ spécifiques des isotopes, habituellement le Kr^{88} , le Xe^{133} , le Xe^{135} , le I^{131} et le rayonnement γ total pour la détection du combustible défectueux.
- 2) les neutrons retardés du Br^{87} ou du I^{137} pour déterminer l'emplacement du combustible défectueux.

6.2.11 Concentrations d'iode dans le circuit caloporteur

Le permis de la centrale impose une limite quant à la quantité de produits de fission, habituellement les niveaux de I^{131} , pouvant être tolérés dans le réacteur en régime de puissance. Il convient de noter

que lorsqu'il n'y a pas de combustible défectueux, le niveau de I^{131} dans le CC est habituellement très faible. La présence d'un élément de combustible défectueux dans un réacteur en régime permanent peut augmenter ce niveau normal d'un facteur d'environ quatre. Cependant, les transitoires de puissance augmenteront le niveau de I^{131} dans le caloporteur de 10 à 50 fois, c.-à-d. jusqu'à 200 Ci par élément de combustible défectueux en raison des contraintes dues au combustible défectueux.

Par exemple, la limite d'inventaire courante est de 8 curies de I^{131} dans le D_2O du CC. Cette limite relative à l'iode est établie principalement en raison du fait que les rejets environnementaux potentiels sont importants, et découlent des concentrations d'iode élevées dans le CC. Dans ce cas, l'incorporation d'iode par le personnel de centrale due à des fuites de D_2O du CC et à des rejets de vapeur d'iode subséquents en constitue la principale raison.

À titre de précaution contre des augmentations ultérieures de I^{131} jusqu'à la limite d'action, la puissance du réacteur ne devrait pas être changée, car cela pourrait aggraver les défauts. L'écoulement d'épuration du CC devrait être maximisé afin d'éliminer le I^{131} le plus rapidement possible du D_2O du CC. À la limite d'arrêt, le réacteur doit être mis à l'arrêt, le circuit CC doit être refroidi et le débit d'épuration doit être maximisé, jusqu'à ce que la concentration d'iode soit réduite. Comme nous l'avons mentionné précédemment, pour toute défectuosité de combustible, la grappe défectueuse doit être localisée et éliminée du réacteur.

Si le réacteur est mis à l'arrêt en raison de niveaux élevés de I^{131} dans le CC, l'iode observé augmentera souvent (d'un facteur de 20 ou à peu près) suite à la mise à l'arrêt.

Cela ne signifie pas qu'il y aura davantage de combustible défectueux. Ce qui se produit est que davantage d'iode sera rejeté dans le caloporteur du CC par les contraintes additionnelles imputables au combustible défectueux (à cause des changements de température et de pression dans les pastilles/gaines de combustible lors de la mise à l'arrêt).

6.2.12 Notions principales

- Le combustible défectueux est éliminé du réacteur pour les raisons suivantes :

- Réduire les niveaux de rayonnement dans le CC pour le personnel de centrale et pour le public (en cas d'APRP)
- Éviter que des produits de fission pénètrent dans le CC
- Éviter qu'il y ait blocage des canaux ou que les tubes de force soient endommagés pendant le déchargement de combustible
- Éviter une mise à l'arrêt de la centrale une fois que des limites d'arrêt du I^{131} dans le CC sont atteintes
- Il existe trois techniques générales pour détecter et localiser le combustible défectueux : analyse d'échantillons de D_2O du CC, balayage des collecteurs/conduites d'alimentation de sortie et utilisation de détecteurs gamma ou de détecteurs de neutrons haute résolution.
- Les méthodes de détection du combustible défectueux détectent les rayons γ émis par les produits de fission à plus longue période (soit par une activité brute ou par les énergies γ spécifiques). Les rayons γ à plus courte période ou les neutrons retardés sont utilisés pour déterminer l'emplacement du combustible défectueux.
- Pour réduire les niveaux de I^{131} dans le CC, la puissance doit être maintenue constante pour éviter que les défauts s'aggravent, le débit d'épuration doit être maximisé et le combustible défectueux doit être localisé et enlevé.
- La concentration de I^{131} peut augmenter suite aux mises à l'arrêt et pourrait rendre la défauts plus grave en raison des contraintes thermiques et mécaniques.

6.3 Manutention du combustible

La durée de vie d'un réacteur CANDU peut être divisée en trois périodes distinctes du point de vue de la gestion du combustible :

- 1) La période débutant avec la première criticité lorsque le réacteur est chargé de combustible neuf seulement au tout début

- 2) La période débutant avec le chargement de combustible, nécessaire pour maintenir le réacteur critique, jusqu'à l'état d'équilibre final du cœur
- 3) La période d'équilibre, caractérisée par une distribution relativement stable de la puissance globale du cœur et de la combustion. Cette période d'équilibre couvre la majeure partie de la durée de vie du réacteur.

C'est cette dernière période qui nous intéresse du point de vue du chargement de combustible.

La prochaine section discutera des considérations relatives au chargement de combustible, de la détection du blocage des canaux lors du chargement de combustible et de la manutention et du stockage du combustible irradié.

6.3.1 Considérations relatives au chargement de combustible

Le responsable du chargement de combustible fournit une liste de chargement de combustible en spécifiant les canaux qui doivent être chargés. Des programmes informatiques, soit SORO ou RFSP (de l'anglais *Simulation Of Reactor Operation/Reactor Fuelling and Simulation Program*: selon la centrale) fournissent cette liste. Les canaux à charger sont déterminés par certains facteurs, notamment :

- la distribution de puissance
- les niveaux de zone
- la combustion
- les variations dues au chargement de combustible (rapport de la puissance de canal réel à la puissance de canal de référence), la position des mécanismes de contrôle de la réactivité, le nombre et le type de grappes de combustible insérées dans le cœur en dernier lieu, etc.

Seuls les canaux qui figurent dans la liste de chargement du combustible peuvent être chargés.

Bien que de façon générale les renseignements fournis par le SORO/RFSP soient valides, des changements dans les conditions du cœur peuvent s'être produits étant donné qu'il y a eu simulation. Ces changements nécessitent que le SORO/RFSP soit appliqué de nouveau

pour fournir les renseignements à jour. Selon la centrale, ces programmes sont appliqués au moins trois fois par semaine, ou plus souvent lorsque les conditions du cœur changent, c.-à-d. en fonction de la commande des barres de compensation, etc.

Les considérations suivantes sont utilisées pour le choix des canaux à recharger :

- 1) Canaux à taux de combustion plus élevés d'abord. La raison en est que dans ces canaux, le combustible est épuisé et la réactivité est faible. Les canaux à taux de combustion plus élevés ont une puissance moindre et doivent être chargés de manière préférentielle.
- 2) La distribution de puissance du réacteur doit être maintenue symétrique. L'asymétrie dans la distribution de puissance augmente la charge sur le SRR (système de régulation du réacteur) qui doit maintenir un équilibre de réactivité de zone. Cela augmente la probabilité d'un arrêt du réacteur (surpuissance neutronique/surpuissance régionale provoquant des arrêts qui se produisent si la puissance de zone est trop élevée). Pour atteindre la symétrie du flux axial, un nombre égal de canaux doivent être chargés en combustible à partir de chaque extrémité du réacteur. Pour atteindre la symétrie radiale (et azimutale), des nombres proportionnels de canaux peuvent être chargés dans chaque région de contrôle de zone.
- 3) Les canaux possédant le gain de réactivité le plus élevé lors du chargement de combustible peuvent être choisis si la réactivité globale du cœur est faible.

La réactivité du cœur est maintenue en compensant les pertes de réactivité dues au taux de combustion élevé par le gain en réactivité dû au taux de chargement de combustible. Lorsque le taux de chargement de combustible ne peut pas être maintenu, il est nécessaire de charger de combustible les canaux possédant un gain de réactivité élevée lors du chargement de combustible, c.-à-d. les canaux à taux de combustion élevé dans la partie la plus intérieure du cœur.

Si la marge de déclenchement est faible pour un tel canal à gain de réactivité élevée, deux mesures peuvent être prises :

- Réduire la puissance du réacteur (ou se préparer à le faire);

- Avant le chargement de combustible, étalonner les détecteurs NOP/ROP (surpuissance neutronique/surpuissance régionale) afin de restaurer la marge de déclenchement appropriée.
- 4) Les canaux à charger ne doivent pas avoir subi de conditions anormales qui pourraient compromettre le chargement de combustible, comme des problèmes de bouchon de fermeture ou de portée de joint. Cela signifie que la machine de chargement de combustible peut avoir des problèmes à se fixer au canal, à se sceller contre le canal, à replacer la fermeture du canal, etc. Ces conditions pourraient causer une mise à l'arrêt du réacteur pour des réparations.
 - 5) Les grappes de combustible défectueux doivent être retirées le plus rapidement possible. Les rejets de produits de fission dans le CC doivent être évités.
 - 6) Il faut éviter de charger les canaux qui se trouvent près d'autres canaux rechargés récemment. Le chargement de combustible excessif dans une région du cœur peut causer des puissances de grappe élevées (en raison des flux de neutrons élevés), ce qui pourrait causer une surchauffe et des défaillances du combustible.
 - 7) Il n'y aura pas de chargement de combustible lorsque des barres de contrôle (BC) se trouvent dans le cœur. Les BC descendent dans le cœur seulement durant des conditions de fonctionnement anormales (comme les arrêts du réacteur ou les reculs rapides de puissance). Les opérations de chargement de combustible doivent être effectuées seulement pendant des conditions d'opérations normales, c.-à-d. lorsque le réacteur fonctionne à un niveau de puissance en régime permanent.

Durant les opérations de chargement de combustible, il faut éviter les changements de réactivité, c.-à-d. enlèvement/addition de poison, déplacement des barres de compensation, etc. La position des barres de compensation n'impose aucune restriction au chargement de combustible. Cela permet de s'assurer que les effets réels du chargement de combustible sont observables.

Les opérations de chargement de combustible ne doivent pas être effectuées pendant les augmentations de puissance du réacteur.

Durant les transitoires mentionnés précédemment, des transitoires du xénon se produisent. Cela peut donner lieu à des inclinaisons du flux. Comme nous l'avons vu dans le module précédent, les inclinaisons du flux peuvent causer une surchauffe des grappes ou une surpuissance des grappes. Avec l'addition de réactivité positive associée à une grappe de combustible neuve, les problèmes mentionnés précédemment sont aggravés et doivent être évités.

- 8) Compte tenu de tous les facteurs, il convient en pratique de procéder au chargement de combustible dans les zones de faible niveau. Les zones de chargement de combustible à niveau élevé peuvent causer des inondations, et par conséquent, un contrôle inefficace de l'inclinaison du flux. Les niveaux de zone liquide doivent être maintenus à l'intérieur de leur plage de fonctionnement adéquate.

La liste de chargement de combustible fait en sorte que l'on peut charger davantage de canaux que ce qui est prévu. Par conséquent, le personnel de salle de commande dispose d'un certain choix dans les canaux de combustible pour ce qui est des points 4 à 8 de la liste précédente.

6.3.2 États de fonctionnement préférés

L'état préféré durant les opérations de rechargement de combustible sont lorsque le réacteur est critique et lorsqu'il est en exploitation. En voici les raisons :

- a) Le SRR fonctionne lorsque le réacteur est à l'état critique. Il peut détecter et compenser immédiatement les changements de réactivité afin de limiter les transitoires de surpuissance possible. Lorsque le réacteur est sous-critique, les insertions de réactivité ne sont pas observables. Cela peut rendre le réacteur critique plus tôt que prévu, et alors un redémarrage du réacteur est amorcé.
- b) En outre, si le chargement de combustible est effectué alors que le réacteur est à l'arrêt, il pourrait n'y avoir aucune indication du blocage de l'écoulement.

- c) Le zirconium irradié devient fragile, et il l'est encore plus lorsqu'il est froid. Cela augmente les risques d'endommager le combustible lors de la manutention.

Cependant, il convient de rappeler que le chargement de combustible en régime de puissance comporte certains problèmes opérationnels, tels que :

- 1) ouverture de la limite de pression du circuit caloporteur (situation propice à un APRP)
- 2) insertion d'un corps étranger dans le canal (blocage possible de l'écoulement entraînant une surchauffe du combustible)
- 3) distorsions locales du flux (exigeantes pour le SRR)

Le rechargement du réacteur dans n'importe quel état autre que l'état préféré nécessite l'approbation d'une autorité supérieure au superviseur de quart.

6.4 Notions principales

Il existe certaines considérations dont il faut tenir compte au moment de choisir les canaux pour le rechargement de combustible :

- Conditions anormales dans un canal, où il faut s'assurer que le processus de chargement de combustible peut être effectué
- Du combustible défectueux dans le cœur doit être enlevé afin d'éviter les rejets dans le CC
- La proximité de canaux chargés récemment, où il faut s'assurer que la surpuissance et la surchauffe de grappes ne se produisent pas
- Des conditions d'exploitation anormales, où il faut s'assurer que la surpuissance et la surchauffe de grappes ne se produisent pas suite à des transitoires du Xe
- Combustion dans le canal, où il faut s'assurer que le canal n'est pas en sous-puissance

- Distribution de puissance, où il faut s'assurer que l'équilibre de réactivité de zone est maintenue
- Gain de réactivité, où il faut s'assurer que le réacteur demeure critique
- Niveaux de zone liquide, où il faut s'assurer que les zones liquides demeurent à l'intérieur de leur plage de contrôle
- L'état préféré du chargement du réacteur est lorsque le réacteur est critique et qu'il fonctionne. Cela permet au SRR de détecter et de compenser les changements de réactivité. Lorsqu'il est à l'arrêt, la détection du blocage de l'écoulement n'est pas toujours disponible. En outre, le zirconium est fragile lorsqu'il est froid, et il est alors plus probable que le combustible soit endommagé lors de la manutention.
- Une autorisation doit être obtenue pour charger le combustible dans tout autre état que l'état préféré.

6.4.1 Blocage des canaux

L'une des préoccupations associées au chargement de combustible est le blocage d'un canal. Les risques qu'un blocage de canal se produise durant le rechargement de combustible est accru suite à l'insertion de combustible, ou de tiges dans le canal. S'il y a blocage, la circulation du caloporteur est réduite, et il y a un risque de surchauffe du combustible. Cela pourrait causer des dommages au combustible et rejeter des produits de fission dans le CC.

On peut déterminer de plusieurs manières qu'il y a blocage de l'écoulement dans un canal :

- 1) Si le canal rechargé est un canal entièrement instrumenté, une indication de l'écoulement direct est disponible. Un blocage de l'écoulement serait automatiquement associé à une réduction de l'écoulement. Étant donné que très peu de canaux sont entièrement instrumentés (dans certains réacteurs CANDU, il n'y a aucun canal entièrement instrumenté), d'autres méthodes de détection du blocage de l'écoulement sont requises pour les autres canaux.
- 2) La température de sortie du canal est mesurée à chaque conduite d'alimentation de sortie. Cette mesure est prise à

l'aide d'un CTR (capteur de température à résistance). Durant le chargement de combustible, de nombreux changements surviennent dans l'écoulement et la température du canal. Certains de ces changements se produisent en raison de l'enlèvement du bouchon écran, du transporteur de combustible et de l'insertion des tiges dans le canal, et à cause des effets et de l'écoulement de refroidissement de la machine de combustible. Si la température de sortie du canal augmente plus que prévu (comparativement à l'augmentation habituellement pendant l'opération de chargement de routine), il est probable qu'une réduction de l'écoulement avec refroidissement se soit produite.

Bien sûr, cette méthode n'est valide que pour les canaux sans ébullition, étant donné que la température de sortie du canal n'augmente pas au-delà de la température de saturation correspondant à la pression du CC. (À noter que dans certains réacteurs CANDU avec ébullition, du D₂O froid est injecté par la machine de chargement de combustible afin d'éliminer l'ébullition dans un canal avec ébullition lorsqu'il est chargé. Cela permet à la ΔT du canal d'être utilisée pour la détection du blocage de l'écoulement pendant le chargement de combustible.)

- 3) Pour les canaux avec ébullition, une méthode visant à déterminer s'il y a blocage de l'écoulement est la surveillance de ΔP de part et d'autre du canal (mesurée sur les machines de chargement de combustible). La mesure de la ΔP du caloporteur de part et d'autre du canal correspond à un certain écoulement du caloporteur. Si ΔP change de manière importante, c'est qu'il est probable qu'un blocage de l'écoulement se soit produit. Le changement de ΔP indique l'emplacement de l'écoulement.
 - Par exemple, si ΔP de part et d'autre d'un canal diminue de manière importante, il est probable qu'un blocage de l'écoulement se soit produit à la conduite d'alimentation d'entrée ou de sortie. Disons qu'il y a un blocage de l'écoulement de 95 % dans la conduite d'alimentation d'entrée du canal. L'écoulement réduit diminue les pertes par frottement dans le canal et les conduites d'alimentation. La pression de sortie du canal sera très proche de la pression du collecteur de sortie.

La pression à l'entrée du canal ne sera pas autant influencée par le collecteur d'entrée en raison du blocage, et par conséquent la pression d'admission des canaux s'approchera de la pression à la sortie du canal. Comme on peut le voir, la ΔP de part et d'autre du canal a diminué (ΔP s'approche de zéro à mesure que l'écoulement diminue). De même, un blocage de la conduite d'alimentation de sortie du canal peut faire en sorte que la pression s'approche de la pression d'admission des canaux, et que la diminution de la ΔP du canal soit semblable.

- Par exemple, si la ΔP de part et d'autre du canal augmente de manière importante, il est probable qu'un blocage de l'écoulement se soit produit dans le canal. Disons qu'il y a un blocage de l'écoulement de 95 % dans le canal. L'écoulement réduit diminuera les pertes par frottement dans le canal et les conduites d'alimentation. La pression à la sortie du canal sera très proche de la pression du collecteur de sortie. La pression d'admission du canal sera très proche de la pression du collecteur d'entrée. Comme on peut le voir, la ΔP de part et d'autre du canal a augmenté (ΔP s'approchera de la ΔP entre les collecteurs d'entrée et de sortie à mesure que l'écoulement diminue).

La détection d'un blocage de l'écoulement sur chaque canal durant l'exploitation est peu pratique, étant donné qu'il est improbable que des blocages surviennent durant les opérations, autres que le chargement de combustible. La détection est particulièrement difficile à réaliser lorsqu'il s'agit d'un canal avec ébullition, dans lequel un blocage serait détecté par une procédure de vérification de l'écoulement. Dans cette procédure, la sortie du réacteur est réduite périodiquement, ce qui diminue les températures de sortie du canal en-deçà de la température de saturation. À ce moment-là de la procédure, les températures de sortie du canal seront vérifiées et l'on doit s'assurer que les lectures sont correctes et qu'elles répondent aux changements de la puissance du réacteur. S'il n'y a pas de changement, ou que la température demeure à la température de saturation, on peut présumer qu'il y a eu blocage de l'écoulement. Des mesures correctrices seront requises (c.-à-d. vérifier l'état des canaux avec les machines de chargement de

combustible, essayer de débloquent le canal, réduire la puissance davantage, procéder à une mise à l'arrêt, etc.).

6.4.2 Manutention du combustible irradié

Le combustible irradié déchargé du réacteur continue de produire des quantités importantes de chaleur. Une grappe de combustible produit quelques kW de chaleur de désintégration pendant plusieurs heures après la décharge. Par exemple, une grappe de combustible irradié de type courant produit environ 10 kW de chaleur une heure après avoir été déchargé du cœur. Le refroidissement à l'air naturel peut éliminer seulement 1 kW de cette chaleur. Si la chaleur de désintégration n'est pas évacuée, la gaine se détériorera en raison de l'oxydation à température élevée.

Une grappe de combustible irradié est extrêmement radioactive. Par exemple, le débit de dose à un mètre d'une grappe de type courant dans l'air est $\sim 100\,000$ rem/h après un jour suivant le moment où elle a été déchargée du cœur. Une exposition de 20 secondes à une distance de un mètre pourrait causer une dose de 600 rem, à toutes fins pratiques, une dose létale. Évidemment, il faut se protéger contre des doses aussi élevées.

Pour ces deux raisons, le combustible irradié doit être refroidi adéquatement et blindé en tout temps. Par conséquent, le refroidissement et le blindage adéquats sont assurés pendant le temps de résidence des grappes de combustible, à la fois dans la machine de chargement de combustible et durant le transfert vers la travée de stockage du combustible irradié.

À un certain moment dans le processus de manutention du combustible, lorsque l'on transfère le combustible de la machine de chargement vers la travée de stockage de combustible irradié, la grappe de combustible peut être exposée à l'air. Cependant, cela ne dure qu'un moment (quelques minutes tout au plus) et n'entraînera pas de défaillance du combustible si l'on reprend le refroidissement.

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, une autre préoccupation relative au combustible irradié est que la gaine devient fragile suite à une irradiation et est particulièrement fragile lorsqu'elle est froide. On doit prendre des précautions minutieuses pour manipuler le combustible irradié durant tout le processus de chargement et de déchargement du combustible.

6.4.3 Manutention du combustible défectueux

Certains problèmes particuliers se présentent lorsque l'on manipule des grappes de combustible défectueux en raison de la contamination potentielle qui pourrait s'étendre.

Les grappes de combustible peuvent subir une défaillance lorsqu'elles sont dans le cœur, ou durant le processus de manutention du combustible. La détection et la détermination de l'emplacement du combustible défectueux ont été décrites.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, à un certain moment dans le processus de manutention du combustible irradié, les grappes de combustible peuvent être exposées à l'air. À ce moment-là, des échantillons des particules en suspension dans l'air et de l'iode peuvent être prélevés pour déterminer la présence de combustible défectueux. Lorsque les champs d'échantillonnages des particules en suspension dans l'air augmentent du double de leur valeur normale, on peut présumer qu'il y a du combustible défectueux. Cela permet d'identifier une grappe défectueuse ou à tout le moins de limiter les défaillances à une paire de grappes. La surveillance durant le processus de déchargement du combustible peut également permettre d'identifier les grappes de combustible défectueux.

Dans la plupart des centrales, le combustible défectueux est traité normalement et envoyé à la travée de stockage du combustible irradié (TSCI). Dans certaines centrales, le combustible défectueux est laissé dans la machine de chargement alors qu'elle est encore rattachée au réacteur. Cela permet au circuit d'épuration du CC d'éliminer une grande proportion des produits de fission qui s'échappent.

Dans la TSCI, la grappe de combustible défectueux sera identifiée et examinée et pourrait être stockée dans des fûts spécialement conçus pour le combustible défectueux, ou dans le cas où les défauts sont mineurs, elle pourrait être stockée avec le reste du combustible irradié.

6.4.4 Surveillance de la travée de stockage du combustible irradié

Le combustible irradié est extrêmement radioactif et chaud. La radioactivité et la chaleur sont causées principalement par les produits de fission qui se désintègrent.

Les grappes de combustible irradié émettent essentiellement des rayons γ . Il y a également beaucoup d'activité α (issue de la désintégration du U_{238}) et de l'activité β (issue de la désintégration des produits de fission) dans les grappes, mais ces deux types de particules

sont à courte portée et absorbées dans les grappes. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les rayons γ émis par une grappe de combustible après un jour seront d'environ 100 000 rem/h à 1 mètre. Même après de plus longues périodes, ces champs γ pourraient être très élevés (1 000 rem/h à 1 mètre après un mois, 10 rem/h à 1 mètre après un an).

La chaleur de désintégration peut être également assez importante. À noter qu'une grappe de combustible de type courant produit environ 10 kW de chaleur de désintégration une heure après avoir été déchargée du cœur. Même après deux semaines, la production de chaleur de désintégration sera environ de 1 kW. Cette entrée de chaleur dans la TSCI pourrait être très élevée lorsque le réacteur doit être déchargé complètement de son combustible comme c'est le cas lors d'un accident. (À noter que les exigences relatives au refroidissement à long terme ne sont pas aussi exigeantes, étant donné que la chaleur de désintégration d'une grappe après un an sera de ~1 watt.)

Il est clair que la TSCI doit fournir un blindage et un refroidissement adéquats en tout temps. La TSCI est remplie d'eau déminéralisée parce que l'eau déminéralisée ne contient pas d'impuretés en suspension ou dissoutes. Cela réduit au minimum le risque de corrosion du combustible et des systèmes de la TSCI et maintient la TSCI libre pour l'inspection et la manutention du combustible. L'eau déminéralisée dans la TSCI permet :

- d'assurer le blindage contre le rayonnement
- d'assurer un milieu de refroidissement pour évacuer la chaleur de désintégration
- de servir de circuit d'épuration

Le blindage contre le rayonnement gamma est assuré au mieux par des éléments lourds, comme le plomb. Cependant, la même quantité de blindage peut être assurée par une épaisseur suffisante d'éléments plus légers. Par conséquent, quelques mètres d'eau agissent comme un blindage très efficace. Un blindage équivalent est assuré par 8 mm de plomb ou 98 mm d'eau pour une énergie gamma de 1 MeV. Ces épaisseurs réduiront les champs de moitié.

Le système de refroidissement de la TSCI doit permettre d'évacuer toute la chaleur de désintégration des grappes de combustible stockées. Ce circuit de refroidissement TSCI est composé de pompes de

circulation, d'échangeurs de chaleur, et de collecteurs d'entrée et de sortie. Une redondance suffisante est assurée à des fins de fiabilité.

Les paramètres suivants sont surveillés dans l'eau de la TSCI :

- a) Pour maintenir la pureté de l'eau, une petite portion de l'inventaire total est passée dans le circuit d'épuration. Le rôle du circuit d'épuration est d'éliminer les matières solides en suspension, afin de réduire les matières solides dissoutes et d'éliminer les produits de corrosion (y compris les contaminants amenés dans la TSCI par les grappes transférées). Ces substances peuvent corrompre les composantes du circuit. Le circuit d'épuration permet également d'éliminer l'eau en excès dans la TSCI et de la diriger vers le système des déchets liquides radioactifs. Le circuit comprend des dromes, des pompes, des filtres et des colonnes échangeuses d'ions.

La conductivité et la turbidité dans la TSCI sont surveillées afin de s'assurer que la concentration des impuretés est maintenue à un niveau raisonnablement bas. Lorsque ces paramètres dépassent leurs limites supérieures, les filtres et les résines échangeuses d'ions doivent être remplacés.

- b) La température de la TSCI doit être surveillée et maintenue à l'intérieur de certaines limites, habituellement autour de 30 °C. Si l'eau de la TSCI dépasse les limites, les parois de la TSCI seront endommagées (dans certaines centrales, il y a un revêtement de résines époxy, qui peut être endommagé par des températures élevées et les changements de température). L'étranglement de l'écoulement dans les vannes ESBP du côté secondaire des échangeurs de chaleur de la TSCI effectue automatiquement le contrôle de la température.
- c) L'eau contenue dans la TSCI doit être maintenue à un niveau suffisamment élevé pour assurer un blindage adéquat. Si le niveau de l'eau est trop bas, le blindage sera insuffisant. Si le niveau de l'eau est trop élevé, cela pourrait causer un détournement de l'eau propre (à la sortie de la colonne échangeuse d'ions) vers le système des déchets liquides radioactifs. Par conséquent, le niveau de l'eau doit être surveillé et contrôlé. Le contrôle du niveau est assuré au moyen d'un commutateur supérieur et inférieur. Si le niveau est trop bas, les vannes d'eau d'appoint déminéralisée

s'ouvrent davantage. Si le niveau est trop élevé, les vannes laissant passer l'effluent contenant les résines échangeuses d'ions s'ouvrent davantage.

- d) L'écoulement de l'eau de la TSCI par les circuits de refroidissement et d'épuration est surveillé et contrôlé afin de s'assurer que les exigences en matière de refroidissement et d'épuration sont respectées.

La salle de la TSCI est dotée d'un système de ventilation et de filtration visant à éliminer les matières particulaires radioactives et à évacuer les gaz. Le combustible défectueux dans la TSCI rejettera des produits de fission qui risquent de contaminer la TSCI. Les bulles de gaz qui montent à la surface de l'eau indiquent qu'il y a rejet de produits de fission gazeux et, par conséquent, qu'il y a des gaz radioactifs dans la TSCI (la TSCI est dotée de moniteurs de rayons γ locaux, ainsi que de moniteurs de la radioactivité brute évacuée). De l'hydrazine peut être ajoutée dans le but d'éliminer les rejets de produits de fission gazeux provenant de la surface de l'eau de la TSCI. Cela donne au circuit d'épuration de la TSCI plus de temps pour les éliminer étant donné que l'hydrazine se combine à l'iode radioactif et forme des produits chimiques qui sont moins volatils et plus solubles dans l'eau de la TSCI.

6.4.5 Notions principales

- Le blocage de l'écoulement peut être détecté grâce à des détecteurs placés dans les canaux entièrement instrumentés, par les températures de sortie de canal dans les canaux sans ébullition et par des mesures de la ΔP dans les canaux avec ébullition.
- Le combustible irradié doit être blindé et refroidi en tout temps. On doit procéder à une manutention physique délicate du combustible parce que la gaine est devenue fragile.
- Dans la plupart des cas, le combustible défectueux sera placé dans des fûts spécialement conçus pour le stockage afin de réduire au minimum l'étendue de la contamination.
- Les paramètres suivants de l'eau de la TSCI sont surveillés : température, écoulement, niveau et pureté.

- Dans l'atmosphère de la TSCI, on doit surveiller les gaz radioactifs. Ces gaz indiquent la présence de combustible défectueux.

6.5 EXERCICES

6.5.1 Comportement du combustible

1. Nommer les six facteurs qui contribuent à la majorité des défauts du combustible.
2. Énumérer les méthodes pouvant être utilisées pour réduire les défaillances du combustible.
3. Nommer et expliquer deux facteurs qui peuvent entraîner une surchauffe du combustible.
4. Dire pourquoi l'établissement d'une limite pour la puissance de grappe et la puissance de canal est nécessaire.
5. Préciser quelles sont les indications que doit surveiller le personnel de salle de commande pour s'assurer qu'une grappe n'est pas en surpuissance.
 - a. Dans un canal avec ébullition (2)
 - b. Dans un canal sans ébullition (1)
6. Décrire comment on obtient la forme du flux de référence pour un réacteur CANDU.
7. Expliquer pourquoi la forme du flux de référence n'est jamais vraiment obtenue dans un réacteur CANDU en exploitation.
8. Décrire l'effet sur la forme du flux du remplacement du combustible à taux de combustion élevé par du combustible neuf dans un réacteur CANDU qui fonctionne à puissance élevée.
9. Définir les termes suivants applicables au réacteur CANDU :
 - a. variations dues au chargement de combustible
 - b. facteur de pointe de la puissance de canal
10. Nommer trois unités de mesure de la combustion.
11. Décrire comment le système ROP protège le combustible contre l'assèchement.

12. Expliquer comment le combustible est protégé contre l'assèchement lorsque les barres de compensation sont hors du cœur.
13. Expliquer comment le personnel de salle de commande peut déterminer qu'aucune grappe n'est en surpuissance.
14. Donner trois raisons pour lesquelles on doit retirer le combustible défectueux du réacteur.
15. Expliquer comment le combustible défectueux est détecté dans un réacteur.
16. Nommer et expliquer deux méthodes utilisées pour localiser le combustible défectueux dans un réacteur.
17. Nommer trois méthodes de réduction de la concentration de l'iode 131 dans le CC.
18. Expliquer pourquoi la concentration d'iode 131 dans le CC peut augmenter lorsque le réacteur est à l'arrêt.

6.5.2 Manutention du combustible

19. Expliquer pourquoi les facteurs suivants sont utilisés pour déterminer si un canal présélectionné peut être rechargé.
 - a. Conditions anormales dans le canal
 - b. Combustible défectueux dans le cœur
 - c. Proximité de canaux chargés récemment
 - d. Conditions de fonctionnement anormales
 - e. Combustion dans le canal
 - f. Distribution de puissance
 - g. Gain de réactivité
 - h. Niveaux de zone liquide
20. Nommer l'état du réacteur préféré pour le rechargement de combustible et expliquer pourquoi.

21. Nommer trois méthodes permettant de déterminer s'il y a blocage dans un canal de combustible pendant le chargement de combustible.
22. Nommer trois grandes préoccupations relatives à la manutention du combustible irradié.
23. Expliquer quelles sont les mesures de précautions additionnelles requises lors de la manutention du combustible irradié.
24. Expliquer quatre paramètres surveillés dans la travée de stockage du combustible irradié.
25. Énumérer quatre paramètres surveillés dans l'eau de la travée de stockage du combustible épuisé. Expliquer l'importance de surveiller chaque paramètre.
26. Nommer le paramètre surveillé dans l'atmosphère de la travée de stockage du combustible irradié.