

# **CHALEUR ET THERMODYNAMIQUE**

OBJECTIFS .....	3
INTRODUCTION.....	4
LE REACTEUR ET LE CIRCUIT CALOPORTEUR EN MODE NORMAL .....	4
FONCTIONNEMENT DES ELEMENTS DU CIRCUIT CALOPORTEUR .....	5
<b>NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE CHALEUR ET DE THERMODYNAMIQUE.....</b>	<b>6</b>
2.0 INTRODUCTION .....	6
2.1 DÉFINITIONS FONDAMENTALES ET UNITES.....	6
2.1.1 <i>Énergie interne</i> .....	6
2.1.2 <i>Enthalpie et enthalpie spécifique</i> .....	7
2.1.3 <i>Travail</i> .....	8
2.1.4 <i>La chaleur</i> .....	8
2.1.5 <i>La température</i> .....	9
2.1.6 <i>L'entropie et l'entropie spécifique</i> .....	10
2.1.7 <i>Chaleurs sensible et latente, chaleurs spécifiques</i> .....	11
2.1.8 <i>Récapitulation des notions fondamentales et des unités utilisées en thermodynamique</i> ...	13
2.2 PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES DE LA VAPEUR ET DE L'EAU .....	14
2.2.1 <i>Comportement sous l'application de chaleur</i> .....	15
2.2.2 <i>Définitions</i> .....	16
2.2.3 <i>Point critique et effets de la pression sur les conditions de saturation</i> .....	17
2.2.4 <i>Titre en vapeur et titre en humidité</i> .....	20
2.2.5 <i>Récapitulation des propriétés thermodynamiques de la vapeur et de l'eau</i> .....	21
2.3 LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE .....	22
2.3.1 <i>Le premier principe de la thermodynamique</i> .....	22
2.3.2 <i>Le second principe de la thermodynamique</i> .....	24
2.3.3 <i>Récapitulation : les deux premiers principes de la thermodynamique</i> .....	25
2.4 TRANSFERT DE CHALEUR.....	26
2.4.1 <i>Rayonnement</i> .....	26
2.4.2 <i>Conduction</i> .....	28
2.4.3 <i>Convection</i> .....	30
2.4.4 <i>Transfert de chaleur par condensation de la vapeur</i> .....	32
2.4.5 <i>Récapitulation des notions fondamentales de transfert de chaleur</i> .....	33
2.5 QUESTIONS DE RÉCAPITULATION — CHALEUR ET THERMODYNAMIQUE.....	35
<b>FONCTIONNEMENT NORMAL DU REACTEUR ET DU CIRCUIT CALOPORTEUR.....</b>	<b>36</b>
3.0 INTRODUCTION .....	36
3.1 PUISSANCE THERMIQUE DU REACTEUR .....	36
3.1.1 <i>Définitions</i> .....	37
3.1.2 <i>Calcul de la puissance thermique</i> .....	38
3.1.3 <i>Puissance du réacteur et différences de température</i> .....	41
3.1.4 <i>Récapitulation des notions fondamentales de la puissance thermique du réacteur</i> .....	41
3.2 LES MODES DE REFROIDISSEMENT DU COMBUSTIBLE .....	42
3.2.1 <i>Les modes de transfert de la chaleur</i> .....	42
3.2.2 <i>Le flux thermique critique et la puissance critique de canal</i> .....	47
3.2.3 <i>Ébullition du caloporteur</i> .....	49
3.2.4 <i>Récapitulation des notions fondamentales du refroidissement du combustible</i> .....	50
3.3 COURBES DE TEMPÉRATURE DANS LE CŒUR DU REACTEUR.....	52
3.3.1 <i>Courbe de température du combustible</i> .....	52
3.3.2 <i>La température du caloporteur et la courbe du flux thermique</i> .....	55
3.3.3 <i>Récapitulation des notions fondamentales sur les courbes de température dans le cœur du réacteur</i> .....	63

3.4	QUESTIONS DE RECAPITULATION – LE CIRCUIT CALOPORTEUR.....	65
	<b>FONCTIONNEMENT DES ÉLÉMENTS DU CIRCUIT CALOPORTEUR.....</b>	<b>68</b>
4.0	INTRODUCTION .....	68
4.1	RÉGULATION DE LA PRESSION D’ALIMENTATION DU CIRCUIT CALOPORTEUR PRIMAIRE .....	68
4.2	LE CONDENSEUR DE PURGE .....	69
4.2.1	<i>Les gaz non condensables dans le condenseur de purge .....</i>	<i>71</i>
4.3	LE PRESSURISEUR.....	72
4.3.1	<i>La régulation du niveau dans le pressuriseur.....</i>	<i>73</i>
4.3.2	<i>Récapitulation des notions fondamentales sur la régulation de la pression d’alimentation du circuit caloporteur primaire .....</i>	<i>74</i>
4.4	INTRODUCTION AUX GENERATEURS DE VAPEUR.....	74
4.4.1	<i>Niveau de liquide du générateur .....</i>	<i>75</i>
4.4.2	<i>Gonflement et contraction stationnaires.....</i>	<i>75</i>
4.4.3	<i>Contraction et gonflement transitoires .....</i>	<i>76</i>
4.4.4	<i>Régulation du niveau d’eau dans le générateur .....</i>	<i>78</i>
4.4.5	<i>Niveau incorrect d’eau dans le générateur.....</i>	<i>80</i>
4.4.6	<i>Récapitulation des notions fondamentales de la sous-section sur le niveau d’eau dans le générateur de vapeur .....</i>	<i>81</i>
4.4.7	<i>La pression dans la chaudière .....</i>	<i>82</i>
4.4.8	<i>Pression de la chaudière et transfert de chaleur .....</i>	<i>84</i>
4.4.9	<i>Pression dans le générateur pendant le réchauffement et le refroidissement du circuit caloporteur primaire.....</i>	<i>86</i>
4.4.10	<i>Récapitulation des notions fondamentales de la sous-section .....</i>	<i>90</i>
4.5	QUESTIONS DE RECAPITULATIONS — ÉLÉMENTS DU CIRCUIT CALOPORTEUR PRIMAIRE .....	91

## OBJECTIFS

Ce module est consacré aux aspects thermodynamiques des réacteurs CANDU, ses grandes divisions sont :

- Introduction
- Notions élémentaires de chaleur et de thermodynamique
- Fonctionnement normal du réacteur et du circuit caloporteur
- Fonctionnement des éléments du système caloporteur

### Introduction

- Connaître la signification des expressions : température, chaleur spécifique, enthalpie, enthalpie spécifique, entropie, entropie spécifique et leurs unités de mesure.
- Décrire les modes de transfert de chaleur.
- Énumérer les facteurs qui affectent le taux de transfert de chaleur.
- Expliquer quels facteurs affectent le transfert de la chaleur par les modes suivants : rayonnement, conduction, convection.

### Le réacteur et le circuit caloporteur en mode normal

- Expliquer comment les hausses de la température et du titre en vapeur du caloporteur, depuis l'entrée du canal jusqu'à sa sortie, dépendent de la puissance du réacteur.
- Décrire les modes de transfert de chaleur du combustible au caloporteur.
- Comparer l'efficacité des différents modes : convection monophasique, ébullition nucléée locale, ébullition saturée dans la masse, évaporation partielle du film et transition, évaporation complète du film.
- Expliquer ce que signifie l'assèchement d'un faisceau de combustible d'un réacteur.
- Décrire l'assèchement d'un canal de combustible où l'écoulement est diphasique.
- Définir le flux thermique critique (FTC) et la puissance critique de canal (PCC).
- Expliquer pourquoi l'on impose des limites à la puissance des faisceaux, des canaux et du réacteur.
- Expliquer pourquoi la présence d'ébullition dans un canal réduit le débit massique du caloporteur.
- Expliquer la forme de la courbe de la température en fonction de l'axe traversant un élément de combustible, sa gaine et les premières couches du caloporteur.

- Décrire comment change la courbe de température quand on augmente la puissance du réacteur, ainsi que les changements de cette même courbe, depuis le début de l'évaporation du caloporteur jusqu'à l'assèchement de l'élément de combustible.
- Expliquer les changements prévisibles du graphique température-enthalpie en cas des changements suivants : réduction du débit du caloporteur, réduction de la pression d'alimentation, hausse de la puissance totale du réacteur, changement dans la distribution du flux neutronique, élévation de la température du caloporteur à l'entrée.

### **Fonctionnement des éléments du circuit caloporteur**

- Décrire les principes du fonctionnement du condenseur de soutirage, notamment l'utilité des deux dispositifs de refroidissement : le reflux et la pulvérisation.
- Expliquer les principes du fonctionnement du pressuriseur.
- Expliquer comment le pressuriseur stabilise les variations transitoires de pression.
- Expliquer les gonflements et les contractions stationnaires et transitoires.
- Expliquer comment, en ajustant la pression du générateur de vapeur, on peut réguler l'équilibre des transferts d'énergie entre les circuits primaire et secondaire.
- Expliquer la relation entre la pression du générateur et la température du fluide caloporteur.
- Expliquer comment, en ajustant la pression dans le générateur de vapeur, on effectue le réchauffement et le refroidissement du système de transfert de chaleur.

## NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE CHALEUR ET DE THERMODYNAMIQUE

### 2.0 INTRODUCTION

La thermodynamique est la branche de la physique consacrée à la chaleur et aux notions connexes. La partie de la thermodynamique qui s'applique particulièrement aux réacteurs nucléaires traite des principes gouvernant le transfert de la chaleur, d'un lieu à un autre, et la transformation de l'énergie d'une forme à une autre. Le transfert de chaleur dans un générateur de vapeur ou encore la transformation de chaleur en travail dans une turbine en sont deux exemples.

Dans une perspective thermodynamique, un réacteur CANDU est un assemblage complexe de systèmes thermodynamiques interconnectés de façon à générer une grande quantité d'électricité. Ce module présente des expressions, des définitions et des principes de la thermodynamique qui vous aideront à comprendre les notions présentées dans les autres modules et, en bout de ligne, les processus thermodynamiques agissant dans un réacteur nucléaire CANDU.

Il faut d'abord définir clairement un système thermodynamique. Par exemple, un système peut être aussi simple qu'une pompe à vélo ou aussi compliqué qu'un réacteur CANDU. Des variables comme le volume, la température, la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie permettent de définir l'état d'un système. À mesure que vous progresserez dans ce module, vous comprendrez comment les changements de ces variables modifient les systèmes thermodynamiques.

### 2.1 DÉFINITIONS FONDAMENTALES ET UNITES

#### 2.1.1 Énergie interne

On dit d'un corps qu'il possède de l'*énergie*, si l'on peut en tirer un travail. Cette définition utilisée en mécanique provient de l'observation que l'on peut transformer en travail la plupart des formes d'énergie. Un corps en mouvement possède de l'énergie cinétique en vertu de son mouvement. Une pierre soulevée du sol possède de l'énergie potentielle à cause de sa position relativement au sol. On trouve aussi de l'énergie potentielle emmagasinée dans un ressort reliant deux corps.

Il existe d'autres formes d'énergie, notamment les énergies électrique, magnétique, chimique et nucléaire. On peut transformer l'énergie d'une forme à une autre qui sera plus propre à un usage particulier. Un réacteur nucléaire, par exemple, transforme l'énergie nucléaire en chaleur, la turbine transforme la chaleur en énergie mécanique et l'alternateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

On appelle l'*énergie interne* d'un système thermodynamique, l'énergie totale qu'il contient. En général, l'énergie interne d'une substance se compose de l'énergie cinétique du mouvement de ses molécules et de l'énergie potentielle contenue dans la dispersion des molécules.

L'*énergie cinétique* d'une molécule dépend de son déplacement : plus sa vitesse est grande, plus elle possède d'énergie cinétique. On comprend mieux l'énergie potentielle des molécules, si on imagine qu'elles sont des sphères reliées par des ressorts. Les ressorts représentent les forces agissant entre les molécules individuelles. L'énergie emmagasinée dans ces ressorts imaginaires constitue l'énergie potentielle des molécules.

On représente l'énergie interne par la lettre  $U$ . Dans le Système international (SI), elle est mesurée en joules (J) et en kilojoules (kJ), un kilojoule valant mille joules.

L'énergie interne est l'une des variables qui caractérisent l'état d'un système thermodynamique. Il serait très difficile de comptabiliser toute l'énergie interne d'une substance, mais les processus thermodynamiques ne s'intéressent qu'aux *changements* de l'énergie interne.

On mesure l'énergie interne totale relativement à un point zéro, défini arbitrairement, mais correspondant à une condition de référence précise. Ceci est analogue à la mesure de l'énergie potentielle gravitationnelle d'un corps (son altitude). On admet qu'elle est nulle lorsque le corps repose sur le sol.

### 2.1.2 Enthalpie et enthalpie spécifique

Dans le cadre de ce cours, l'*enthalpie*,  $H$ , est une variable de système plus utile que l'énergie. On l'a défini comme la somme de l'énergie interne et du produit de la pression par le volume du système.

$$H = U + p \cdot V .$$

Dans un système thermodynamique dont le volume et la pression sont fixes, l'enthalpie joue le même rôle que l'énergie interne et se mesure également en kilojoules (kJ). Le point de référence pour l'enthalpie varie d'une substance à l'autre. Pour l'eau légère ( $H_2O$ ), c'est une température d'environ  $0,01\text{ }^\circ\text{C}$  pour une pression d'environ  $0,61\text{ kPa(a)}$ . Il s'agit de la seule combinaison de pression et température où glace, eau et vapeur peuvent coexister. On l'appelle le point triple de l'eau. Chaque substance possède son propre point triple. Par convention, on définit le point zéro de l'enthalpie d'une substance comme son point triple.

On désigne sous l'expression d'*enthalpie spécifique*,  $h$ , l'enthalpie contenue dans 1 kg de matière. (On rencontre parfois l'expression

Notes

*enthalpie massique*). La valeur de l'enthalpie spécifique dépend de la substance, de la pression qu'elle subit, de sa température et de sa phase. Les tableaux thermodynamiques pour la vapeur indiquent l'enthalpie spécifique de l'eau ordinaire et de l'eau lourde. On mesure l'enthalpie spécifique en kJ/kg.

On peut donc, trouver la valeur de l'enthalpie,  $H$ , en multipliant l'enthalpie,  $h$ , par la masse,  $m$  :

$$H = m \cdot h .$$

### 2.1.3 Travail

Le *travail*,  $W$ , est le produit de la force par le déplacement.

Une pompe à vélo ordinaire nous permet de comprendre aisément la notion de travail en thermodynamique. Si l'on déplace le piston, le travail,  $W$ , est simplement le produit de la force,  $F$ , par le déplacement,  $d$ , ainsi :

$$W = F \cdot d .$$

En mécanique, la pression,  $p$ , est définie comme étant la force divisée par la surface,  $S$ , du piston, ainsi :

$$p = \frac{F}{S} \quad \text{et} \quad F = p \cdot S .$$

Le changement de volume,  $\Delta V$ , équivaut à :

$$\Delta V = S \cdot d \quad \text{et} \quad d = \frac{\Delta V}{S} .$$

À partir de ce qui précède, l'on obtient la relation qui définit le travail en thermodynamique :

$$W = p \cdot \Delta V .$$

Puisqu'il est associé aux variations d'énergie interne, ou d'enthalpie, le travail se mesure également en kilojoules (kJ).

### 2.1.4 La chaleur

On a longtemps cru que la chaleur était un fluide qui s'écoulait spontanément d'un corps chaud à un corps froid. On utilisait une unité de mesure particulière : la calorie. De nos jours, nous comprenons mieux la nature de la chaleur qui n'est qu'une autre forme d'énergie. La chaleur est

la mesure d'un changement d'énergie interne d'un système thermodynamique, lorsque aucun travail n'est effectué.

En pratique, et étant donné la façon dont l'enthalpie est définie, la chaleur est aussi égale à la variation de l'enthalpie d'un système qui n'effectue pas de travail. Nous reviendrons plus tard sur cette question. Lorsque l'on effectue du travail, la variation d'énergie interne est la somme du travail et de la chaleur. Représentée par la lettre  $Q$ , la chaleur est mesurée en kilojoules (kJ).

### 2.1.5 La température

La *température* est la quantité physique qui caractérise la quantité de chaleur contenue dans un corps. Lorsque deux parties d'un système thermodynamique sont en contact thermique, la chaleur s'écoulera d'une partie à l'autre. On dit que la chaleur est transférée spontanément de la partie la plus chaude, à la plus froide. Cet écoulement se poursuivra jusqu'à l'atteinte d'un équilibre. Les parties en contact seront alors à la même température.

#### Échelles de température

Certaines variables physiques sont mesurées avec différentes unités de mesure. Par exemple, on mesure les distances en miles ou en kilomètres et la force en livres ou en newtons. La température possède aussi différentes unités de mesure ou *échelles de température*. L'échelle Celsius est la plus connue. Lorsque l'on utilise les degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), on dénote la température avec un  $t$  minuscule. À la pression atmosphérique,  $0^{\circ}\text{C}$  et  $100^{\circ}\text{C}$  sont respectivement les points de congélation et d'ébullition de l'eau. Autrement dit, il y existe, pour cette pression, cent divisions égales entre les points de fusion de la glace et d'ébullition de l'eau. Les divisions de cette échelle sont égales, au-dessus de  $100^{\circ}\text{C}$  et sous  $0^{\circ}\text{C}$ . On a établi l'échelle absolue de température, ou échelle Kelvin, à partir de l'observation des gaz soumis au refroidissement. On a découvert qu'à volume et masse constants, la pression du gaz baissait proportionnellement avec la température.

L'extrapolation de cette pente, pour un gaz idéal, indique que la pression sera zéro à une température de  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Cette limite absolue de température est le point zéro de l'échelle Kelvin. Le kelvin (ou K) est l'unité de mesure de température absolue. On utilise le  $T$  majuscule pour représenter les températures absolues. Les kelvins ont la même amplitude que les degrés Celsius, ce qui facilite le passage d'une échelle à l'autre, ainsi :

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

ou

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 .$$

### 2.1.6 L'entropie et l'entropie spécifique

L'*entropie* est une variable thermodynamique importante. On la représente par la lettre  $S$ .

On appelle *processus réversible* ou *processus idéal* les processus que l'on peut renverser exactement. En réalité, aucun processus ne peut être renversé exactement.

Tout comme pour la température, on ne peut définir l'entropie d'un système que s'il est à l'équilibre. En pratique, nous ne nous intéresserons qu'aux changements d'entropie.

L'entropie est la mesure de la chaleur,  $\Delta Q$ , échangée entre le système thermodynamique et son environnement dans un processus réversible, à température constante. La variation d'entropie du système est égale à :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} .$$

On voit aisément que l'unité de mesure de l'entropie est le kJ/K.

L'*entropie spécifique*,  $s$ , ou l'entropie pour un kilogramme de matière, est mesurée en kJ/kg K. (On rencontre parfois l'expression entropie massique.) L'entropie spécifique est liée à l'entropie par la relation :

$$S = m \cdot s .$$

On appelle *adiabatique* ou *isentropique* (dont l'entropie reste constante) un processus qui n'échange pas de chaleur avec son environnement.

Une turbine idéale n'aurait ni friction ni perte de chaleur, et donc elle n'échangerait pas de chaleur avec la vapeur ou son environnement. Dans une pareille turbine, la vapeur subirait un processus adiabatique et réversible, où une partie de son enthalpie serait transformée en travail, sans déplorer de perte. Bien qu'un tel processus ne puisse se produire dans la vie réelle, la « machine idéale » peut servir de point de référence pour mesurer la qualité d'un processus concret.

Dans une turbine réelle, l'échange de chaleur n'est pas égal à zéro (à cause des pertes et de la friction), en conséquence, on tire moins de travail de l'enthalpie de la vapeur.

L'entropie de la vapeur augmente dans un processus réel (donc irréversible). Autrement dit, si l'entropie du système s'accroît, on tirera moins de travail d'une quantité donnée d'enthalpie. En conséquence, l'entropie d'un système est liée à la quantité de chaleur qui produit un travail.

### 2.1.7 Chaleurs sensible et latente, chaleurs spécifiques

Lorsque l'on transfère de la chaleur à un système, on modifie son énergie interne. Ce changement peut modifier soit l'énergie cinétique des molécules, soit leur énergie potentielle, ou les deux à la fois. Comme nous l'exposons plus bas, un transfert de chaleur s'accompagne parfois d'un changement de phase.

On peut définir deux types de chaleur : la chaleur sensible et la chaleur latente. La première provoque une hausse de la température d'un corps sans en changer la phase. La deuxième accompagne un changement de phase sans en changer la température.

Une substance peut changer de phase de plusieurs façons. Les deux phénomènes les plus connus sont l'évaporation et la fusion, Si le flux de chaleur est inversé, on parlera de condensation et de solidification. Donc, on peut distinguer la chaleur latente en chaleur d'évaporation (ou de condensation) et chaleur de fusion (ou de solidification).

Examinons d'abord la chaleur sensible. La quantité de chaleur sensible,  $Q$ , transférée à un corps, ou d'un corps, provoque un changement de température d'une valeur initiale,  $t_{in}$ , à une valeur finale,  $t_{fin}$ . Ainsi,

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = m \cdot c \cdot (t_{fin} - t_{in}),$$

où  $m$  est la masse du corps en kg,  $c$  la capacité calorifique spécifique de la matière dont le corps est composé (définie plus bas) et  $\Delta t$  la variation de température causée par le transfert de chaleur.

Dans cette équation,  $\Delta t$  sera positive si  $t_{fin} > t_{in}$ , c'est-à-dire si l'on transfère de la chaleur au corps. Dans le cas contraire, la perte chaleur,  $\Delta t$  sera négative. Donc, la quantité de chaleur sensible,  $Q$ , sera soit positive si le corps gagne de l'énergie, soit négative s'il en perd dans le transfert de chaleur. Cette convention de signe permet d'exprimer mathématiquement la direction de l'échange de chaleur relativement au corps.

La capacité calorifique spécifique (ou massique) est la quantité de chaleur, exprimée en kilojoules, que l'on doit communiquer ou prendre à un kilogramme d'une substance donnée pour que sa température monte ou descende de 1 °C. On la mesure en kJ/kg °C. Le qualificatif *spécifique*,

Notes

signifie que cette grandeur (et d'autres que nous introduirons plus loin) est définie relativement à un kilogramme de matière.

Vous trouverez au tableau 1, les capacités calorifiques spécifiques de certaines substances.

<i>Substance</i>	<i>Capacité calorifique spécifique kJ/ kg °C</i>
aluminium	0,88
cuiivre	0,39
acier	0,63
eau**	4,19
huile	1,97
vapeur d'eau (à 101,3 kPa)	2,02
air (à 101,3 kPa)	1,01
hydrogène** (à 101,3 kPa)	14,5

**Tableau 1**  
**Capacités calorifiques spécifiques\* de certaines substances**

\* Les capacités calorifiques spécifiques dépendent peu de la température. Les valeurs données dans ce tableau sont valides pour des températures entre 0 et 100 °C, environ. La capacité calorifique spécifique de la vapeur et des gaz dépend fortement de la pression. Pour un volume donné, plus forte est la pression, plus grand sera le nombre de molécules et, donc, la capacité calorifique.

\*\* REMARQUE : On peut voir au tableau 1 que l'eau et l'hydrogène ont des capacités thermiques spécifiques très élevées, ce qui en font de bons fluides caloporteurs.

Examinons maintenant la chaleur latente. On peut calculer la chaleur latente,  $Q$ , associée au changement de phase d'un corps, en multipliant la masse du corps,  $m$ , par la chaleur latente spécifique de fusion  $l_f$ , ou d'évaporation,  $l_e$ , de la substance dont il est composé.

On mesure les chaleurs latentes spécifiques en kJ/kg. La chaleur latente spécifique représente l'énergie requise pour faire changer d'état un kilogramme d'une substance donnée à température constante. La chaleur reçue par  $m$  kg d'une substance qui s'évapore ou qui se liquéfie est :

$$Q = m \cdot l_e \quad \text{ou} \quad Q = m \cdot l_f .$$

Pour conserver la convention de signe, présentée plus haut, la chaleur latente est positive lorsqu'elle est communiquée à un corps (lors de sa

fusion ou son évaporation) et négative lorsqu'elle en est extraite (lors de sa solidification ou sa condensation).

Si la chaleur latente spécifique de fusion d'une substance est pratiquement constante, sa chaleur latente spécifique d'évaporation, tel que discuté plus haut, dépend de la pression. Les valeurs du tableau ci-dessous sont valides à la pression atmosphérique normale (101,3 kPa).

<i>Substance</i>	<i>Température d'évaporation (°C)</i>	<i>Chaleur latente spécifique d'évaporation (kJ/kg)</i>
hélium	-269	21,0
hydrogène	-253	452
ammoniac	-33,3	1370
eau	100	2260
hydrazine	114	1440

**Tableau 2**

**Chaleur latente spécifique d'évaporation de certaines substances**

L'eau est la substance du tableau 2 qui possède la chaleur latente d'évaporation la plus élevée. Cette chaleur élevée en fait un bon caloporteur même s'il y a évaporation.

Voici une équation valide pour la chaleur sensible et la chaleur latente :

$$Q = m \cdot \Delta h$$

Cette équation relie la chaleur échangée par le système à sa masse et au changement d'enthalpie spécifique.

**2.1.8 Récapitulation des notions fondamentales et des unités utilisées en thermodynamique**

- L'enthalpie est une mesure de la quantité d'énergie contenue dans un système thermodynamique.
- L'enthalpie spécifique est l'enthalpie que contient un kilogramme d'une substance, mesurée relativement à son point triple. Il existe des tables qui donnent l'enthalpie spécifique pour différentes températures et pression de composés communément trouvés, notamment l'eau légère et l'eau lourde.
- Lorsqu'un système change d'état, son enthalpie et son énergie interne changent également. Un échange d'énergie entre le système et son environnement peut se traduire par du travail, de la chaleur ou les deux.

Notes

- La chaleur est une mesure de l'énergie interne, ou enthalpie, échangée entre un système et son environnement, quand aucun travail n'est effectué.
- L'énergie interne,  $U$ , l'enthalpie,  $H$ , le travail,  $W$  et la chaleur,  $Q$ , sont tous mesurés en kilojoules (kJ).
- Si deux parties d'un système thermodynamique sont mises en contact, il y aura un échange de chaleur entre-elles jusqu'à l'atteinte d'un équilibre, c'est-à-dire jusqu'au point où il n'y a plus de différence de température.
- On utilise dans ce cours deux échelles de température : l'échelle Celsius et l'échelle Kelvin. Les divisions de ces deux échelles sont égales (un centième de la différence de température entre la solidification et l'évaporation de l'eau à la pression atmosphérique), mais leur point zéro est différent. L'échelle Celsius utilise comme origine le point de congélation de l'eau à la pression normale. Le point zéro de l'échelle Kelvin est le « zéro absolu » qui correspond à  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Lors du transfert de chaleur entre un système et son environnement, via un processus réversible à température constante, la variation d'entropie du système,  $\Delta S$ , sera égale au rapport de la quantité de chaleur à la température absolue.
- $$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$
- L'entropie spécifique ou l'entropie par kilogramme, d'une substance est le rapport entre son entropie,  $S$ , et sa masse,  $m$ .
- Si l'entropie d'un système augmente, la quantité de travail que l'on peut en tirer diminue.
- La chaleur sensible est liée au changement de température d'un corps, mais sans changement de phase. La chaleur latente — dont on peut distinguer la chaleur latente de condensation (ou d'évaporation) et la chaleur latente de solidification (ou de fusion) — cause un changement de phase, mais sans changement de température, en autant que la pression reste constante.

## 2.2 PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES DE LA VAPEUR ET DE L'EAU

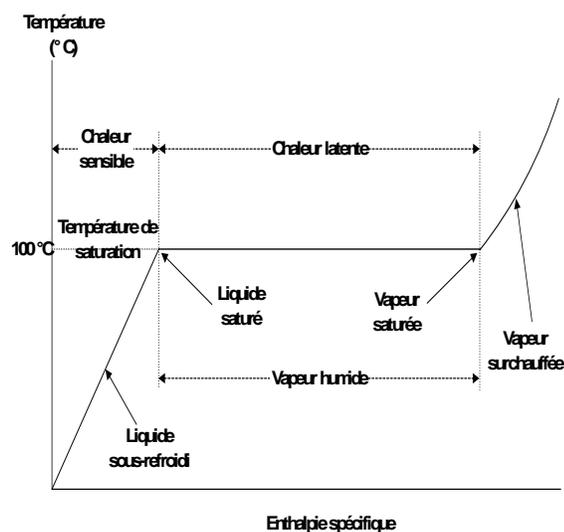
Nous mentionnions plus haut que toute substance existe sous une des trois phases : solide, liquide ou gaz. Un système thermodynamique qui reçoit

ou perd de la chaleur ou encore qui subit ou exerce un travail pourra subir un changement de phase.

### 2.2.1 Comportement sous l'application de chaleur

Un réacteur CANDU contient de grandes quantités d'eau légère et d'eau lourde. Il est crucial de comprendre comment ces liquides peuvent être affectés par les transferts de chaleur. Dans cette section, nous examinons leur comportement lorsqu'on leur communique ou on leur enlève de la chaleur. Au début du chapitre 2, nous précisons que le transfert de chaleur à un système, modifie son énergie interne et son enthalpie. Ce transfert peut être accompagné d'un changement de température ou de phase.

La figure 2.1 montre les changements subis par 1 kg d'eau auquel on ajoute de la chaleur, à une pression atmosphérique constante.



**Figure 2-1**  
**Chauffage de l'eau légère à la pression atmosphérique**

Votre expérience quotidienne — et ce graphique — vous informent que si l'on ajoute de la chaleur à de l'eau chaude, sa température s'élèvera jusqu'à ce qu'elle se mette à bouillir à 100 °C. On dit de l'eau chauffée qui n'a pas encore atteint le point d'ébullition qu'elle est sous-refroidie. Si l'on ajoute de la chaleur, l'ébullition se poursuivra, mais la température restera stable.

On se retrouve avec un mélange d'eau et de vapeur, appelé vapeur humide. Une fois que l'ébullition est complétée, sa température continuera à s'élever si l'on continue le chauffage. On parle de vapeur surchauffée.

En enlevant de la chaleur, on inverse tout simplement le processus. La condensation se produit à la même température : 100 °C.

Dans la prochaine section, nous nommerons et définirons tous les états du fluide et les expressions connexes.

### 2.2.2 Définitions

#### Température de saturation

La température de saturation,  $t_s$ , est la température à laquelle l'ébullition ou la condensation se produit. Elle dépend de la pression du système; ainsi, plus la pression est élevée, plus la température de saturation sera haute. Nous reviendrons plus tard sur la relation entre ces deux grandeurs.

On définit également la température de saturation comme la température la plus élevée que peut avoir un liquide dans un état stable pour une pression donnée. Bien que l'on puisse faire monter la température d'un liquide au-dessus de  $t_s$  en le chauffant très rapidement, il sera dans un état instable, et une violente ébullition s'ensuivra. En contrepartie,  $t_s$  est la plus basse température à laquelle la vapeur peut exister dans un état stable.

#### Pression de saturation

La pression de saturation,  $p_s$ , est la pression à laquelle l'ébullition, ou la condensation, se produit pour une température donnée.

Nous pouvons également définir  $p_s$  comme étant la pression la plus basse à laquelle une substance est sous forme liquide pour une température donnée, ou encore la pression la plus élevée où une substance peut être dans la phase gazeuse. (Nous discuterons plus loin des effets de la réduction de la pression d'un liquide sous  $p_s$  et de l'augmentation de la pression d'un gaz au-dessus de  $p_s$ .)

#### Liquide sous-refroidi

Un liquide sous-refroidi est un liquide qui n'a pas été assez chauffé pour atteindre la température de saturation. Conséquemment, ce liquide existe à une température inférieure à  $t_s$ .

#### Liquide saturé

Un liquide saturé est un liquide qui existe à la température de saturation. Nous utilisons l'adjectif *saturé*, puisque le liquide est saturé de chaleur : il ne peut pas absorber plus d'énergie sans se transformer en vapeur.

### **Vapeur saturée**

La vapeur saturée est une vapeur qui ne contient aucun liquide et qui existe à la température de saturation correspondant à une pression donnée (c'est pourquoi elle est dite *saturée*). L'ébullition est complète et on n'a pas ajouté plus de chaleur.

### **Vapeur humide**

La vapeur humide est un mélange de vapeur et de liquide qui existe à la température de saturation. S'il y a beaucoup de liquide dans le mélange, les propriétés de la vapeur seront proches de celles du liquide saturé. Si elle contient peu de liquide, ses propriétés seront proches de celles de la vapeur saturée. On peut aussi dire de la vapeur humide qu'elle a reçue une partie, mais non la totalité de la chaleur latente de d'évaporation.

### **Vapeur surchauffée**

On appelle vapeur surchauffée, la vapeur ayant reçu toute sa chaleur latente et qui a été chauffée davantage. Sa température dépasse  $t_s$ .

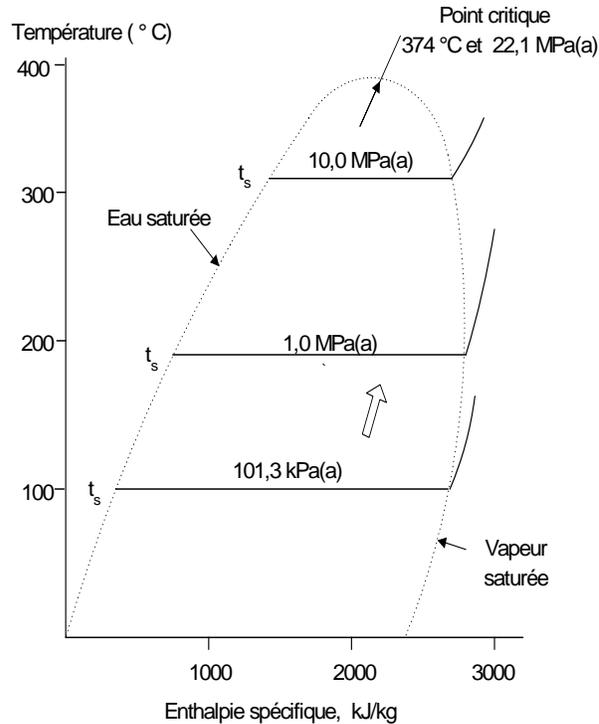
#### **2.2.3 Point critique et effets de la pression sur les conditions de saturation**

La courbe de la figure 2-1 est valide pour la pression atmosphérique. La figure 2-2 montre deux autres courbes de chauffage pour des pressions plus élevées : 1 et 10 MPa(a).

La courbe de saturation illustrée relie les points qui correspondent aux états de l'eau saturée et de la vapeur saturée pour des pressions très différentes. Ce graphique nous permet de répondre aux questions suivantes :

1. Quel est l'effet de l'augmentation de la pression sur la température de saturation ?
2. Quel est l'effet de l'augmentation de la pression sur l'enthalpie spécifique du liquide saturé ?
3. Quel est l'effet de l'augmentation de la pression sur la chaleur latente d'évaporation ?
4. Quel est l'effet de l'augmentation de la température sur l'enthalpie spécifique de la vapeur saturée ?

Notes



**Figure 2-2**  
**Effet de la pression sur les conditions de saturation**

### Question 1

Pour toute température de saturation, il existe une pression de saturation correspondante, et réciproquement. La température de saturation suit l'augmentation de la pression, jusqu'à 374 °C, pour une pression d'environ 22,1 MPa(a). À ce point, s'observent des changements importants que nous discuterons plus bas.

### Question 2

L'enthalpie spécifique du liquide saturé augmente avec la pression.

### Question 3

La valeur de la chaleur latente varie en fonction inverse de la pression. À près de 22,1 MPa(a), la chaleur latente est égale à zéro. Sous cette énorme pression (plus de 220 fois la pression atmosphérique), la vapeur est comprimée au point que les molécules sont aussi rapprochées les unes des autres que dans l'eau. D'un point de vue moléculaire, ces deux phases sont identiques, c'est pourquoi il n'est pas nécessaire d'ajouter de l'énergie pour passer d'une phase à l'autre.

On appelle *point critique*, cet état particulier qui correspond à une pression critique de  $\cong 22,1$  MPa(a) et une température critique de  $\cong 374$  °C. Comme nous le mentionnions plus haut, au-delà de la température critique, une substance ne peut exister qu'à l'état gazeux. Aux températures inférieures, cette substance sera un liquide, ou une vapeur, en fonction de sa pression et de sa température.

#### Question 4

Si l'on augmente la pression, l'enthalpie spécifique de la vapeur saturée augmentera aussi. Toutefois, un examen plus approfondi révèle que l'enthalpie atteint un maximum de 2 802 kJ/kg, pour une pression de saturation de 3,2 MPa(a). À partir de ce point, une augmentation de la pression entraînera une baisse de l'enthalpie spécifique. Sa valeur sera tombée à 2 107 kJ/kg au point critique.

Nous sommes maintenant prêts à expliquer ce qui arrive à un liquide sous-refroidi, à une vapeur humide et à une vapeur surchauffée subissant des variations de pression à enthalpie constante.

#### Liquide sous-refroidi

Si l'on élève la pression en maintenant l'enthalpie constante, la température de saturation s'élèvera, augmentant l'écart entre la température de saturation et la température du liquide sous-refroidi.

Si on diminue la pression, la température de saturation descendra jusqu'à ce qu'elle atteigne la température du liquide. À ce point, le liquide ne sera plus sous-refroidi. Si l'on continue à diminuer la pression, la température du liquide reste stable, mais dépassera la température de saturation ce qui déclenchera son ébullition. Au cours de ce procédé, la chaleur sensible est transformée en chaleur latente ce qui génère une vapeur humide.

#### La vapeur humide

Si on augmente la pression, alors que l'enthalpie reste constante, on pourra observer divers effets, selon les conditions de la vapeur et de pression.

Aux pressions inférieures à 3,2 MPa(a) — la pression correspondant à la valeur maximale pour l'enthalpie spécifique pour une vapeur saturée —, toute augmentation de pression se traduira par une augmentation de la quantité d'humidité de la vapeur. Si, au départ, la vapeur contient beaucoup d'humidité, le résultat final pourrait être de l'eau sous-refroidie.

Si en augmentant la pression, on dépasse les 3,2 MPa(a), on pourra observer différents effets selon la quantité d'eau contenue dans la vapeur (le titre en vapeur). Si la vapeur contient de l'humidité, on observera une

augmentation de son titre en eau et une élévation de température. Il pourrait être possible, en bout de ligne d'avoir de l'eau sous-refroidie. En contrepartie, si la vapeur est très sèche, on pourrait observer une augmentation du titre en vapeur et de la température et, en bout de ligne, se retrouver avec une vapeur surchauffée.

Si la pression décroît, à enthalpie constante, le processus est inversé.

### **Vapeur surchauffée**

Si la pression reste inférieure à 3,2 MPa(a), une augmentation de la pression se traduira par une élévation de la température de saturation et une réduction correspondante du degré de surchauffe. Si l'on continue le processus, l'on observera un changement de phase.

En contr partie, si au départ, la pression dépassait les 3,2 MPa(a), une augmentation de la pression causera une montée de la température de saturation. Toutefois, comme vous pouvez le déduire de la figure 2-2, l'enthalpie nécessaire à la production d'une vapeur saturée décline à partir de ce point et donc la vapeur restera bien surchauffée.

### **2.2.4 Titre en vapeur et titre en humidité**

La vapeur humide est un mélange de gouttes d'eau et de vapeur qui coexistent à la température de saturation. Il existe deux moyens d'exprimer la composition de la vapeur humide.

**Le titre en vapeur (appelé aussi fraction sèche) :  $q$ .**

La fraction sèche est le rapport de la masse de vapeur à la masse totale du mélange de liquide et de vapeur :

$$q = \frac{\text{masse de la vapeur}}{\text{masse de la vapeur} + \text{masse du liquide}} .$$

Le titre en masse de vapeur n'a pas de dimension. Sa valeur varie de 0 à 1 et peut s'exprimer comme un pourcentage.

Si  $q = 0$ , il n'y a pas de vapeur, le fluide est de l'eau saturée.

Si  $q = 1$ , il n'y a pas de liquide, le fluide est de la vapeur saturée.

**Le titre en humidité (appelé aussi fraction humide) :  $t_h$ .**

Ce paramètre est le rapport entre la masse du liquide à la masse totale du mélange de liquide et de vapeur :

$$t_h = \frac{\text{masse du liquide}}{\text{masse de la vapeur} + \text{masse du liquide}}$$

La somme des titres en vapeur et en humidité est égale à 1 (ou 100 %), en d'autres termes :  $q + t_h = 1 = 100\%$ . Si l'un de ces paramètres est connu, on peut facilement trouver l'autre.

### 2.2.5 Récapitulation des propriétés thermodynamiques de la vapeur et de l'eau

- La température de saturation est la température d'évaporation ou de condensation pour une pression donnée. Dans le même ordre d'idée, on appelle pression de saturation, la pression à laquelle le liquide s'évapore ou la vapeur se condense pour une température donnée. À une pression de saturation élevée correspond une température de saturation élevée. La relation entre ces deux grandeurs n'est toutefois pas proportionnelle.
- À l'équilibre, un liquide est sous-refroidi ou saturé. Il sera sous-refroidi si sa température est inférieure à la température de saturation, en d'autres mots, si sa pression est plus élevée que la pression de saturation.
- Un liquide est saturé quand sa température est égale à sa température de saturation (ou que sa pression est égale à la pression de saturation) et qu'il n'y a pas de vapeur.
- À l'équilibre, la vapeur peut être saturée ou surchauffée. Elle sera saturée si sa température est égale à la température de saturation, ou si sa pression est égale à la pression de saturation et qu'il n'y a pas de liquide. Elle sera surchauffée si sa température est supérieure à la température de saturation, en d'autres mots, si sa pression est inférieure à la pression de saturation.
- Une vapeur humide est un mélange de liquide et de vapeur, à la pression et à la température de saturation. On peut exprimer la composition de la vapeur humide en titre massique de vapeur ou de liquide ou en fraction humide et fraction sèche.
- Le titre en vapeur est le rapport de la masse de vapeur sur la masse totale de la vapeur humide.
- Le titre en liquide est le rapport de la masse de liquide sur la masse totale de la vapeur humide.

- La somme des titres en liquide et en vapeur (ou des fractions de liquide et de vapeur) est égale à un.

## 2.3 LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

Depuis toujours, les humains rêvent d'une machine qui pourrait produire un travail sans consommer quoi que ce soit. On appelle une telle machine le moteur perpétuel.

C'est à James Watt que l'on doit la première machine à vapeur utilisable industriellement. Ce moteur produisait du travail par la combustion de carburant qui produisait de la chaleur, laquelle était communiquée à un fluide (parfois appelé le fluide actif) pour être transformée en travail. Le fait que la chaleur (ou une autre forme d'énergie) soit nécessaire à la production d'un travail par une machine est la base du premier principe de la thermodynamique.

Or, la machine de Watt ne transformait pas toute la chaleur en travail, une partie était perdue dans l'atmosphère environnante.

Sadi Carnot a prouvé qu'à cause des pertes de chaleur dans l'environnement, on ne pouvait pas transformer toute la chaleur en travail. Cette découverte est liée à l'observation universelle que la chaleur ne s'écoule pas spontanément d'un corps à un autre dont la température serait plus élevée. Ce sont les bases du second principe de la thermodynamique.

C'est à l'étude des machines et des moteurs, et à ces observations, que l'on doit le développement de la thermodynamique. Historiquement, on prouvera plus tard que tous les processus thermodynamiques (transfert de chaleur, échange de chaleur, etc.) suivent les deux principes de la thermodynamique que l'on a généralisés.

### 2.3.1 Le premier principe de la thermodynamique

Le premier principe de thermodynamique n'est que la reformulation, pour les processus thermodynamiques, d'une loi générale de la physique, la loi de conservation de l'énergie, laquelle s'énonce comme s:

*L'énergie\* ne peut être ni créée ni détruite, on ne peut que la transformer d'une forme à une autre.*

\* Toutefois, dans les réactions nucléaires, la masse,  $m$ , est liée à l'énergie,  $E$ , par la célèbre équation d'Einstein :  $E = mc^2$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière. On peut donc transformer de la masse en énergie et inversement.

Quand un système thermodynamique est dans un état donné, il est caractérisé par des paramètres comme la pression, la température, le

volume, l'enthalpie, l'entropie, etc. Si ces paramètres changent, le système pourra échanger de la chaleur ou du travail avec son environnement.

Les définitions de l'énergie interne, du travail et de la chaleur (*supra* Définitions fondamentales et unités) nous permettent de comprendre l'énoncé du premier principe :

*Lors d'une transformation, le changement d'énergie interne d'un système est égal à la somme du travail et de la chaleur échangés entre le système et son environnement :*

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W .$$

$\Delta Q$  et  $\Delta W$  seront positifs si le travail et la chaleur sont communiqués au système et négatifs s'ils sont extraits du système.

Pour appliquer le premier principe à un cycle thermodynamique, l'on doit se rappeler que l'énergie interne est une variable du système. Dans un cycle, le système retourne à son état initial, donc à la même valeur d'énergie interne. Dans ce cas, le travail fourni par le système est égal à la chaleur échangée par le système. Ce qui s'exprime :

$$\Delta W = -\Delta Q .$$

L'absorption de chaleur produite dans le noyau du réacteur, par le fluide du circuit caloporteur primaire se traduit par une augmentation de son énergie interne. Si nous négligeons l'expansion du fluide caloporteur, le travail effectué est zéro et, donc, l'équation de premier principe s'écrira :

$$\Delta U = \Delta Q = \Delta H .$$

Si on applique le premier principe au changement de phase d'une quantité de fluide caloporteur — il y a évaporation — on ne peut plus négliger le travail. Si le changement de phase a lieu à pression constante, le travail sera :

$$\Delta W = -p \cdot V .$$

Le signe moins indique que le système effectue un travail. On peut réécrire la première loi comme suit :

$$\Delta U = \Delta Q - p \cdot V$$

ou, en isolant la chaleur gagnée :

$$\Delta U + p \cdot V = \Delta Q .$$

Notes

Puisque  $H = U + p \cdot V$ , on peut donc écrire :

$$\Delta H = \Delta Q.$$

Dans le cas plus compliqué où la pression et le volume du fluide caloporteur (le caloporteur) changent, le travail échangé avec le système est la somme de deux termes. Le premier est le travail d'expansion (ou le travail du débit), c'est-à-dire le travail fait contre la pression externe et le deuxième, le travail,  $W'$ , effectué contre d'autres forces externes, notamment, le travail nécessaire pour entretenir la rotation de la turbine. Dans ce cas plus compliqué, on peut écrire la première loi en combinant le travail d'expansion et l'énergie interne :

$$\Delta H = \Delta Q + \Delta W'$$

ou

$$H_2 - H_1 = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}} = W'_{\text{entrée}} - W'_{\text{sortie}}.$$

En réarrangeant les termes, on obtient :

$$H_1 + Q_{\text{entrée}} + W'_{\text{entrée}} = H_2 + Q_{\text{sortie}} + W'_{\text{sortie}}.$$

### 2.3.2 Le second principe de la thermodynamique

Il existe deux formulations équivalentes du second principe de la thermodynamique qui s'appliquent à des processus différents. Le premier s'applique aux machines thermiques, le second, au transfert de chaleur.

*Il est impossible de convertir toute la chaleur fournie à une machine thermique en un travail utile.*

*La chaleur ne peut s'écouler naturellement d'un corps à un autre dont la température est plus élevée.*

Appliqué aux moteurs thermiques, le premier énoncé signifie que l'on ne peut transformer en travail toute la chaleur fournie à une machine. On appelle *rendement thermique* le rapport entre le travail obtenu d'une machine et la chaleur qui lui est fournie.

$$\eta = \frac{W_{\text{produit}}}{Q_{\text{fournie}}}.$$

Un moteur thermique utilise un fluide actif qui capture de la chaleur d'une source thermique chaude, il transforme ensuite une partie de cette chaleur en travail et finalement libère le reste dans une source thermique froide.

Un moteur thermique effectue un cycle — au début de chaque cycle, le fluide du moteur retourne au même état thermodynamique, il a notamment la même énergie interne, la même enthalpie, la même pression et le même volume. Si l'on applique le premier principe à ce processus,  $\Delta U$  sera égal à zéro, donc le travail produit sera :

$$-\Delta W = \Delta Q,$$

où  $\Delta Q$  est la différence entre  $Q_1$ , la chaleur fournie à la machine, et  $Q_2$ , la chaleur libérée par le moteur dans son environnement. Donc :

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Carnot a prouvé que  $Q_2$  ne pouvait être égal à zéro et que le rapport  $\frac{Q_2}{Q_1}$  était égal au rapport  $\frac{T_2}{T_1}$ , où  $T_1$  est la température absolue de la source chaude et  $T_2$  la température absolue de la source froide. Donc, le rendement thermique maximum d'une machine thermique sera :

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Le deuxième énoncé rappelle que la température de la source froide doit être inférieure à la température de la source chaude pour que la chaleur passe spontanément de l'une à l'autre. Les réfrigérateurs semblent y contrevenir. Ce n'est pas le cas, car ils dépensent de l'énergie pour réaliser ce transfert.

Les modes de transfert de chaleur sont au centre du fonctionnement des réacteurs CANDU. Nous reviendrons souvent sur ces notions dans le reste du texte.

### 2.3.3 Récapitulation : les deux premiers principes de la thermodynamique

Le premier principe de la thermodynamique est une reformulation, pour les processus thermodynamiques, d'une loi plus générale de la physique : la loi de conservation de l'énergie.

*Lors d'une transformation, le changement d'énergie interne d'un système est égal à la somme du travail et de la chaleur échangés entre le système et son environnement.*

Le second principe de la thermodynamique a deux formulations équivalentes qui s'appliquent à tout processus thermodynamique :

*Il est impossible de convertir toute la chaleur fournie à une machine thermique en un travail utile.*

*La chaleur ne peut s'écouler naturellement d'un corps à un autre dont la température est plus élevée.*

## 2.4 TRANSFERT DE CHALEUR

Lorsque l'on discute de transfert (ou diffusion) de la chaleur, on définit la température comme le paramètre caractérisant l'équilibre. La chaleur se diffusera entre des parties d'un système, ou entre des systèmes, que si une différence de température existe.

Le transfert de chaleur à un corps résultera en un changement de sa température, en un changement de sa phase, ou les deux. Si la température d'une substance change, l'équation suivante s'applique :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T .$$

S'il s'agit d'un liquide qui s'écoule :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T .$$

Si une substance change de phase ou de température et de phase, on utilisera l'équation suivante :

$$Q = m \cdot \Delta h$$

ou

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h .$$

Cette section traite des mécanismes de diffusion de la chaleur et du débit du flux thermique.

### 2.4.1 Rayonnement

Les particules dont sont formés les corps émettent de l'énergie électromagnétique dans l'infrarouge. Cette énergie radiante permet le transfert de chaleur à partir de la matière. Ce rayonnement est émis par tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu. Plus élevée est la température d'un corps, plus intense sera son rayonnement thermique.

Parallèlement à l'émission de chaleur, un corps absorbe et réfléchit le rayonnement émis par d'autres corps dans son voisinage. Si le taux

d'émission est égal au taux d'absorption, le taux de transfert par rayonnement est zéro puisque le corps ne gagne ni ne perd de chaleur.

Dans le vide, le rayonnement est le seul mécanisme de transfert de chaleur possible. Alors que des molécules sont nécessaires pour le transfert de chaleur d'un lieu à un autre par conduction et convection, l'énergie rayonnante est « portée » par des photons. Ceux-ci se déplacent facilement dans les gaz et la vapeur. Par contre, les solides et, en moindre mesure, les liquides absorbent et réfléchissent les photons. Autrement dit, le rayonnement thermique ne pénètre ni les solides ni les liquides. Donc, en pratique, le rayonnement n'est possible que si le vide ou du gaz (ou de la vapeur) séparent les corps entre lesquels la chaleur est diffusée.

Un exemple de rayonnement est la chaleur transférée au travers d'un film de vapeur formé autour d'un faisceau de combustible, en cas d'ébullition excessive ou d'assèchement du caloporteur.

L'espace annulaire rempli de gaz entre le tube de force et son tube calandre est un autre endroit où le rayonnement contribue beaucoup au transfert de chaleur. Dans cet espace, la convection forcée est l'autre mode important de transfert de chaleur.

Le taux de transmission de la chaleur par rayonnement dépend de :

- l'étendue de la surface,  $A$
- la température absolue,  $T$
- le type de matériau
- la texture de la surface (par exemple les surfaces mates et rugueuses émettent plus de rayonnement);
- la noirceur de la surface (ce sont les corps noirs qui émettent les rayonnements les plus intenses).

On peut écrire la quantité de chaleur émise comme :

$$\dot{Q} \propto T^4.$$

Nous donnons cette équation qu'à titre d'illustration. Nous avons omis des coefficients par souci de simplicité. Le symbole «  $\propto$  » dénote la proportionnalité.

Le taux de transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps s'accroît de façon saisissante avec leur différence de température,  $\Delta T$ , ce qui est très différent de la conduction et de la convection dont le taux de transfert est proportionnel à  $\Delta T$ .

Pour conclure, on peut négliger le rayonnement lorsque  $\Delta T$  est petit ou si le transfert de chaleur a lieu au travers d'un solide ou d'un liquide.

Toutefois, si la différence de température est importante et que la chaleur est transférée dans un environnement de gaz ou de vapeur, le rayonnement peut devenir le mécanisme principal de transfert de chaleur.

### 2.4.2 Conduction

Avec la conduction, la diffusion de la chaleur s'effectue sans transfert de masse. La chaleur passe d'une partie d'un corps à un autre ou à un autre corps avec lequel il est en contact. La diffusion est réalisée par le transfert d'énergie cinétique d'une molécule à l'autre. Les molécules se déplacent, mais leurs déplacements sont imperceptibles. Par exemple, dans les solides, elles vibrent de part et d'autre d'un point fixe, mais, en définitive, sans transfert de masse d'un endroit à un autre.

La conduction se produit surtout dans les solides. Dans les liquides, elle est habituellement négligeable par rapport à la convection. Toutefois, si nous arrêtons ou empêchons le mouvement des liquides, la conduction prédominera.

Deux exemples : les petites bulles de gaz emprisonnées dans les plaques de polystyrène expansé ou les poches de gaz ou d'humidité emprisonnées dans les isolants en fibres de verre.

La conduction est un mode de transfert de chaleur très utilisé dans les réacteurs CANDU. Notamment, dans les tubes ou les plaques des échangeurs de chaleur, les parois de la tuyauterie, les boîtiers et rotors des moteurs de plusieurs machines comme les pompes et les turbines. La conduction est aussi présente dans les pastilles de combustible du réacteur.

Le taux de transfert par conduction dépend de la capacité du matériau de conduire la chaleur,  $k$ , de l'aire,  $A$ , à travers laquelle la chaleur s'écoulera, de l'épaisseur (du mur) qui sera traversé,  $L$ , et de la différence de température entre le côté chaud et le côté froid,  $\Delta T$ . Ce qui se résume ainsi :

$$\dot{Q} = k \cdot \frac{A}{L} \Delta T.$$

Cette équation n'est valide que pour des températures constantes, et des surfaces planes, d'épaisseur uniforme dont la conductivité thermique est constante sur l'intervalle de température.

On appelle *conductivité thermique* la capacité d'un matériau de conduire de la chaleur. Elle est représentée par le symbole  $k$  et se mesure en  $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . D'un point de vue physique, la conductivité thermique est le taux de diffusion de la chaleur (en W) au travers d'une plaque dont l'aire est de  $1 \text{ m}^2$ , l'épaisseur de 1 m et pour laquelle existe de part et d'autre un écart

uniforme de température de 1 °C. La conductivité thermique varie beaucoup avec la température. Celle des gaz varie aussi en fonction de la pression.

Le tableau 1.4 donne les conductivités thermiques de substances courantes, aux conditions atmosphériques normales.

<i>SUBSTANCE</i>	<i>CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (W/m °C)</i>
aluminium	220
laiton amirauté	110
acier au carbone	55
titane	22
acier inoxydable	15
UO <sub>2</sub>	3,4*
H <sub>2</sub> O	0,64
D <sub>2</sub> O	0,62
hydrogène	0,17
air sec	0,03

**Tableau 4**  
**Conductivité thermique de substances courantes**

\* Conductivité du UO<sub>2</sub> à  $T = 1000$  °C.

On peut, à partir du tableau ci-dessus, faire diverses observations :

- Les métaux sont de bien meilleurs conducteurs que les liquides, lesquels sont eux-mêmes supérieurs aux gaz.
- La conductivité thermique du UO<sub>2</sub> est la plus petite de toutes les substances recensées dans le tableau.
- Autrement dit, notre combustible est un mauvais conducteur de chaleur, ce qui a des répercussions sur la sûreté.
- La conductivité thermique de l'hydrogène est plusieurs fois supérieure à celle de l'air. C'est pourquoi l'on refroidit le générateur de vapeur avec de l'hydrogène.
- La conductivité thermique de l'acier inoxydable est très petite par rapport à celle de l'acier au carbone. Conséquemment, de forts gradients de température sont produits pendant le soudage. C'est une des raisons pourquoi il est plus difficile de souder l'acier inoxydable que l'acier au carbone.

### 2.4.3 Convection

Dans la convection, la chaleur est entraînée par les mouvements d'un fluide. Puisque la convection dépend du déplacement de molécules d'un endroit à un autre, elle ne se produit que dans les fluides qui peuvent se déplacer librement. Il n'y a pas de convection dans les solides et celle-ci est en général négligeable dans les « liquides piégés ». La convection peut être naturelle ou forcée comme nous l'expliquons plus bas.

#### Convection forcée

Dans ce type de convection, les différences de pression forcent le mouvement du liquide. Différents équipements peuvent produire cette différence de pression : pompes, ventilateurs, compresseurs. Ce type de convection est très répandu dans les centrales CANDU.

Un exemple : l'eau de refroidissement est pompée dans le condenseur. En contact avec la surface intérieure du condenseur, elle absorbe de la chaleur qui sera rejetée dans le lac. Un autre exemple : lorsque les pompes du système caloporteur fonctionnent, le fluide caloporteur absorbe la chaleur des surfaces externes des faisceaux de combustible et la transporte dans le générateur de vapeur, où elle sera communiquée à la surface intérieure de la tuyauterie du générateur.

#### Convection naturelle

S'il n'y a pas de mécanisme externe, on parle de convection naturelle, aucune pompe ne force le mouvement du fluide. Les différences de masse volumique ou de pression dans le liquide causées par le transfert de chaleur sont à la source du mouvement.

Ce sont les différences de masse volumique et la gravité qui entraînent le mouvement du liquide. Les liquides plus denses, plus lourds descendent, ce qui force le mouvement ascendant du liquide plus léger.

La conception des réacteurs CANDU fait peu appel à la convection naturelle. Un exemple est l'ébullition de l'eau dans le générateur de vapeur. Quand la vapeur monte de l'eau vers le sommet du générateur, elle transporte avec elle la chaleur extraite du fluide caloporteur.

Un autre exemple de convection naturelle est le thermosiphon. Ce phénomène remplace, en cas de panne, les pompes du circuit caloporteur primaire. Il s'agit d'un élément d'une importance extrême, dont nous discuterons en détail dans un module à venir.

Un autre exemple de convection naturelle est l'écoulement de la vapeur extraite vers le réchauffeur d'eau d'alimentation. La vapeur réchauffe les surfaces externes des tubes du réchauffeur d'eau et se condense. En se

condensant, son volume décroît énormément, ce qui réduit la pression enveloppant le réchauffeur d'eau à une pression inférieure à celle de la pression de la tuyauterie d'extraction de vapeur près de la turbine. Cette différence de pression entretient le débit de vapeur.

Quel que soit le type de convection, le débit de chaleur diffusée d'un corps, ou à un corps, est proportionnel à la différence de température entre le corps et le fluide,  $\Delta T$ ; à l'aire de la surface exposée au fluide,  $A$ ; et à la capacité du fluide de transporter la chaleur par convection. Cette capacité est le coefficient de transfert de chaleur et son symbole est  $h$ . On peut écrire :

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T .$$

Le coefficient de transfert de chaleur représente le débit de chaleur entre un fluide en mouvement et une surface de un mètre carré, entretenu par une différence de température de 1 °C. Il est mesuré en  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ . La valeur de ce coefficient dépend de certaines propriétés physiques telles la masse volumique du fluide, sa capacité calorifique spécifique, sa conductivité thermique et sa viscosité, qui sont toutes des propriétés qui dépendent du type de liquide. Ces valeurs sont toutes dépendantes de la température. Pour les gaz et les vapeurs, la pression est également un facteur important, puisqu'elle affecte la « densité » du liquide, c'est-à-dire le nombre de molécules par volume unitaire.

Enfin, le coefficient dépend de la vitesse du fluide, plus elle est élevée, plus élevé sera le débit de transfert de chaleur. Toutefois, la relation entre la vitesse du fluide et le coefficient de transfert convectif n'est pas proportionnelle : un changement dans la vitesse du liquide produira un changement beaucoup plus petit du coefficient.

À cause du grand nombre de variables, il est très difficile de déterminer avec précision la valeur de ce coefficient. Le tableau 5 donne les étendues approximatives de ce coefficient pour différents liquides dans différentes conditions.

Condition		Coefficient de transfert convectif ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )
convection naturelle	gaz	5 – 30
	eau	100 – 900
convection forcée	gaz	10 – 300
	eau	300 – 11 000
	métaux liquides	6 000 – 110 000
changement de phase	liquides en ébullition	3 000 – 60 000
	vapeurs condensantes	6 000 – 110 000

**Tableau 5**  
**Coefficients de transfert convectif**

On peut, à partir du tableau de la page précédente, faire diverses observations relativement au transfert de chaleur :

- Les gaz sont moins efficaces que l'eau, laquelle est moins efficace que les métaux en fusion.
- En général, la convection forcée est plus efficace que la convection naturelle.
- L'évaporation et la condensation sont très efficaces, à cause du mélange vigoureux à la surface de contact du fluide.

#### 2.4.4 Transfert de chaleur par condensation de la vapeur

Le fonctionnement des condenseurs et des réchauffeurs d'eau d'alimentation repose sur ce mode particulier de transfert de chaleur.

Il existe une grande différence entre le transfert de chaleur de la vapeur saturée et le transfert de chaleur par convection de gaz. Lorsque la vapeur saturée touche une surface plus froide, elle se condense immédiatement, ce qui communique de la chaleur à la surface. Le processus de condensation laisse une pellicule de liquide sur la surface de refroidissement. Les transferts de chaleur subséquents ont lieu dans cette pellicule. Son épaisseur a une influence importante sur le taux de transfert de chaleur, puisque l'écoulement laminaire de la pellicule de liquide n'autorise que la conduction comme mécanisme de transfert de chaleur. D'autre part, la conductivité thermique de l'eau est faible. Toutes les autres conditions étant égales, plus la pellicule sera épaisse, plus lent sera le transfert de chaleur.

La viscosité du liquide influe sur l'épaisseur de la pellicule. Or, la viscosité diminue avec l'élévation de la température. (Nous savons déjà que la température de saturation augmente avec la pression.) Enfin, l'épaisseur de la pellicule est également influencée par la rugosité de la surface. Plus elle sera irrégulière plus la pellicule sera épaisse.

L'on doit remarquer qu'une trop grande quantité d'air ou de gaz dans l'enceinte d'un échangeur de chaleur par condensation de vapeur réduira le taux de transfert de chaleur. L'air ou le gaz recouvre certains tubes et forme un isolant efficace ce qui diminue le coefficient de transfert de la chaleur. Dans cette situation, pour communiquer une quantité donnée de chaleur, l'on doit augmenter la température de la vapeur pour compenser la diminution du coefficient de transfert de chaleur. Ceci augmente la pression dans l'enceinte. L'air ou le gaz lui-même exerce une pression qui, selon la loi de Dalton, causera une augmentation supplémentaire de la pression.

$$p_c = p_{\text{vapeur}} + p_{\text{gaz}}$$

Dans un condenseur ou un échangeur de chaleur à condensation, on devrait retirer l'excès d'air et de gaz du flux de vapeur, à l'aide de pompes à vide ou d'éjecteurs d'air.

#### **2.4.5 Récapitulation des notions fondamentales de transfert de chaleur**

On peut exprimer le degré de diffusion de la chaleur d'un corps ou vers un corps comme le produit du débit massique par le changement d'enthalpie spécifique, ce qui tient compte des changements de phase et de température.

S'il n'y a pas de changement de phase, on peut exprimer le transfert de chaleur comme le produit du débit massique par la capacité calorifique spécifique par la différence de température entre l'entrée et la sortie.

Les trois principaux mécanismes de transfert de chaleur sont : la conduction, la convection et le rayonnement. On peut diviser la convection en convection forcée et convection naturelle.

La conduction est le transfert de chaleur sans déplacement de masse, elle se produit dans un corps ou lors du transfert de chaleur entre deux corps en contact.

La convection est le transfert de chaleur par le mouvement dans un fluide, elle peut être naturelle ou forcée, par une pompe ou une autre machine.

On appelle transfert de chaleur par rayonnement, la diffusion de chaleur par l'énergie électromagnétique dans l'infrarouge. Ce mode n'est vraiment efficace que pour les hautes températures, dans le vide ou encore au travers d'un gaz ou d'une vapeur.

En pratique, un corps communique sa chaleur à la fois par conduction, convection et radiation. Toutefois, dans un échangeur de chaleur, le transfert par rayonnement est habituellement négligeable. Donc, on peut exprimer le transfert de chaleur à l'aide d'une seule équation qui combine conduction et convection :

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m,$$

où  $U$  est le coefficient de transfert global,  $A$  la surface de l'échangeur d'air,  $\Delta T_m$  la différence de température moyenne avec la surface.

Cette équation universelle s'applique également aux changements de température et d'état entre deux fluides.

Notes

La condensation de la vapeur est un mécanisme efficace de transfert de chaleur, notamment dans les échangeurs de chaleur.

Puisqu'un excès d'air ou de gaz dans l'enceinte d'un échangeur de chaleur par condensation réduit le taux de transfert de chaleur, il faut l'éliminer à l'aide de pompes à vide ou d'éjecteurs d'air.

## 2.5 QUESTIONS DE RÉCAPITULATION — CHALEUR ET THERMODYNAMIQUE

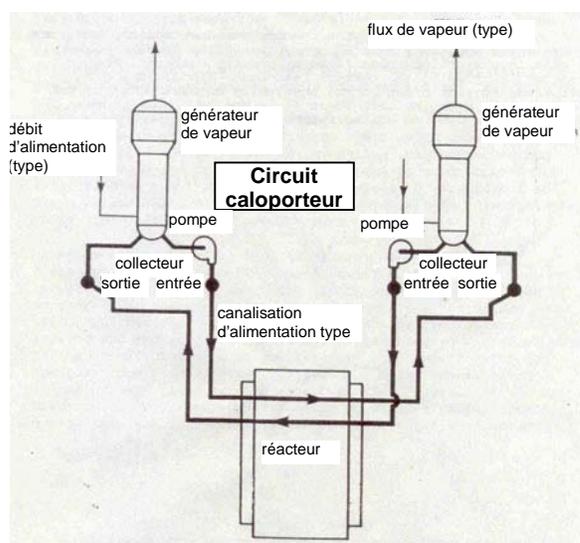
1. Définissez chacune des expressions suivantes et précisez leur unité de mesure habituelle.
  - a. Température
  - b. Chaleur spécifique
  - c. Enthalpie
  - d. Enthalpie spécifique
  - e. Entropie
  - f. Entropie spécifique
  
2. Il existe quatre modes de transfert de l'énergie thermique d'un lieu à un autre, énumérez-les et précisez les facteurs qui influencent chacun des procédés.
  
3. Définissez les expressions suivantes :
  - a. liquide sous-refroidi
  - b. liquide saturé
  - c. vapeur saturée
  - d. vapeur surchauffée
  - e. vapeur humide
  - f. fraction humide
  - g. titre massique de vapeur
  - h. chaleur sensible
  - i. chaleur latente d'évaporation ou de condensation
  - j. pression de saturation
  - k. température de saturation
  
4. Soient des graphiques température-enthalpie montrant différentes courbes à pression constante. Identifiez les éléments suivants et expliquez leur signification.
  - a. point critique
  - b. courbe du liquide saturé
  - c. courbe de vapeur saturée
  - d. régions du liquide, de vapeur et du gaz

## FONCTIONNEMENT NORMAL DU REACTEUR ET DU CIRCUIT CALOPORTEUR

### 3.0 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous abordons la thermodynamique du circuit caloporteur. Nous traiterons en particulier de l'évacuation de la chaleur du combustible. S'il n'était pas refroidi, les gaines pourraient se rompre et les produits de fission seraient dispersés dans le circuit caloporteur.

Un schéma du circuit caloporteur primaire apparaît à la figure 3-1.



**Figure 3-1**  
**Schéma du circuit caloporteur principal**

Le circuit caloporteur primaire (CCP) est un accumulateur de chaleur inversible. La chaleur passe du combustible à l'eau lourde qui la stocke pendant une courte période, avant de la passer au générateur de vapeur.

La figure 3-1 montre que la circulation du fluide caloporteur (le caloporteur) dans le circuit caloporteur est bi-directionnelle : dans des canaux adjacents, le caloporteur s'écoule en sens opposé. Nous décrivons plus loin les processus thermodynamiques associés au transfert de chaleur du caloporteur du circuit primaire, aux générateurs de chaleur.

### 3.1 PUISSANCE THERMIQUE DU REACTEUR

La puissance thermique est générée par les réactions de fission et de désintégration au cœur du réacteur. Cette chaleur est évacuée du réacteur

par différents moyens. L'on construit les réacteurs pour produire de l'électricité, la plus grande partie de la chaleur sera donc utilisée pour générer de la vapeur qui fera tourner la turbine.

### 3.1.1 Définitions

La *puissance thermique* est la chaleur produite par une source, par unité de temps. Plus précisément :

*La puissance thermique du réacteur* est la chaleur produite par le réacteur, par unité de temps.

La puissance thermique du réacteur est la somme de la puissance du flux neutronique et de la puissance provenant de la chaleur de désintégration dont on soustrait la puissance thermique perdue dans le modérateur, les boucliers d'extrémités, la tuyauterie, etc.

Bien que les réactions de fission soient à source de la puissance du réacteur nucléaire, la relation entre la puissance thermique du réacteur et la puissance du flux neutronique n'est pas toujours proportionnelle et ce, à cause de trois phénomènes :

- La chaleur produite par la désintégration radioactive des produits de fission dans le noyau.
- L'inventaire des matières fissiles d'un réacteur en service depuis longtemps comprend environ 6 % de produits de fission, lesquels produisent de la chaleur par désintégration bêta et gamma. La chaleur de désintégration décroît très rapidement après l'arrêt du réacteur.
- La friction du caloporteur dans les canaux est une source de chaleur.

La pression du caloporteur tombe d'environ les deux-tiers dans les canaux de combustible, ce qui contribue au réchauffement du circuit caloporteur primaire. Cette source de chaleur — plusieurs mégawatts — est indépendante de la puissance du réacteur. Elle dépend exclusivement du débit du caloporteur.

Le fluide caloporteur communique de la chaleur au modérateur. La quantité totale de chaleur perdue est proportionnelle à la différence de température entre le caloporteur et le modérateur.

Comme nous disions plus haut, la relation entre la puissance thermique du réacteur et le flux neutronique n'est pas linéaire : à pleine puissance, 93 % de la chaleur provient directement du processus de fission, 6 % de la

désintégration des produits de fission et 1 % des pompes du circuit caloporteur.

Dans ces conditions, environ 95 % de la puissance totale est transférée au circuit caloporteur et 5 % au modérateur.

Lorsque la puissance du réacteur passe de 50 % à 100 %, le ratio de la chaleur produite par désintégration à celle produite par flux neutronique chute immédiatement de moitié, puis il remonte très lentement avec l'ajout de nouveaux produits de fission. Comme nous le mentionnions plus haut, le degré de chaleur dans la pompe est directement proportionnel au débit du caloporteur et, donc, ne devrait pas changer. La chaleur perdue dans le modérateur augmentera légèrement, puisque la température moyenne du caloporteur augmente avec la puissance du réacteur.

Les principales sources de chaleur après l'arrêt du réacteur sont :

- La chaleur de désintégration. Elle correspond à 6 % de la pleine puissance, immédiatement après l'arrêt du réacteur. Elle descend à 1 % après quelques heures.
- La chaleur de la pompe. Comme nous le précisons plus haut, elle dépend du débit du liquide caloporteur.

La plus grande partie de la chaleur est transférée à la vapeur dans le générateur. Une fraction de chaleur est toutefois transmise au modérateur. Le taux global de transfert de chaleur diminue avec le temps, à mesure que la chaleur de désintégration descend.

### 3.1.2 Calcul de la puissance thermique

On effectue un bilan thermique du réacteur afin d'étalonner précisément les détecteurs de flux neutronique, qui sont les principaux appareils de mesure de la puissance aux fins de régulation et lors de l'arrêt du réacteur.

Un bilan thermique est le calcul précis de la chaleur produite dans le réacteur, en tenant compte de toutes les voies d'évacuation et d'injection de la chaleur.

Les voies utilisées pour calculer le bilan sont :

**Vapeur-eau d'alimentation-eau du générateur.** La chaleur est communiquée d'abord à l'eau d'alimentation dans les réchauffeurs puis à l'eau dans le générateur de vapeur. La chaleur sensible et la chaleur latente apparaissent dans les calculs. On détermine la chaleur ajoutée, à partir des mesures du débit de l'eau d'alimentation, de sa température (en amont des réchauffeurs) et la pression dans le générateur (utilisée pour calculer la température de

saturation et la chaleur latente). On inclut également la température et le débit du liquide du deuxième stage de préchauffage.

**Modérateur.** Faute de débitmètre, on estime la chaleur produite dans le modérateur par une fraction fixe de la chaleur dans le système caloporteur. Cette fraction est d'environ 5 %.

**Boucliers d'extrémité et cuve blindée.** De la chaleur est produite dans les boucliers d'extrémité et la cuve blindée. La chaleur rejetée est calculée à partir de mesures de débit et de différence de température.

**Alimentation et soutirage.** De la chaleur est rejetée dans le refroidisseur de soutirage. On calcule la chaleur rejetée à partir des mesures du débit d'alimentation et de soutirage et de la différence de température.

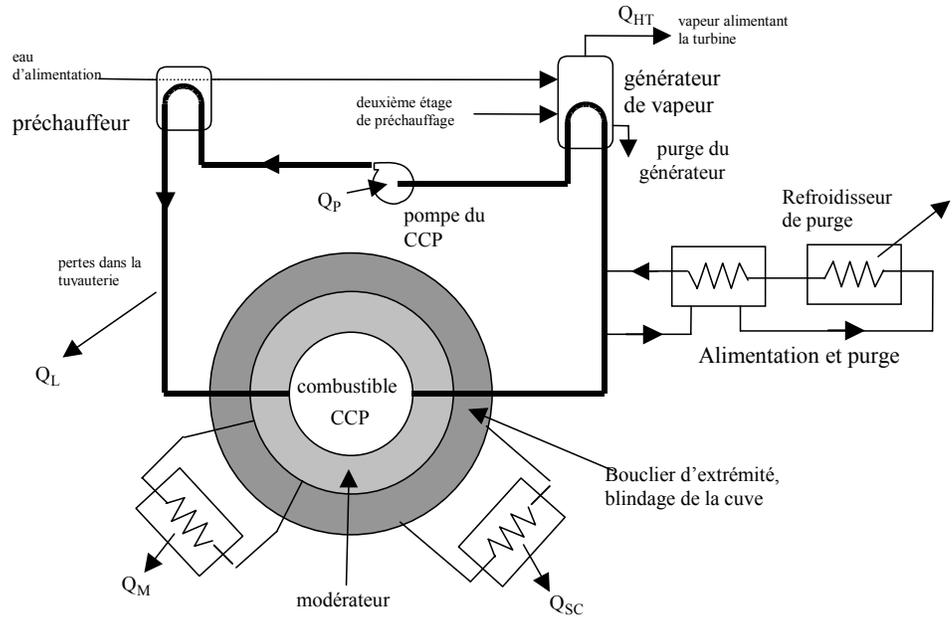
**Facteurs constants.** Il existe d'autres voies d'ajout ou de rejet de chaleur. Puisqu'elles sont stables quel que soit le niveau de puissance, on les a regroupées. Ces facteurs comprennent :

- l'énergie des pompes du circuit caloporteur,
- les pertes de chaleur de la tuyauterie chaude,
- la vapeur rejetée continuellement dans l'atmosphère par le générateur de vapeur.

**La correction pour la fraction sèche de la vapeur.** Calculs d'ajout de chaleur au générateur supposent que la vapeur est sèche à la sortie du générateur. Des tests ont montré que le titre en humidité de la vapeur était d'environ 0,1 %.

Ces voies sont illustrées à la figure 3-2.

Notes



**Figure 3-2**  
**Schéma des voies de la puissance thermique du réacteur**

On exprime la puissance thermique du réacteur avec l'équation suivante :

$$PTR = Q_{HT} + Q_M + Q_{SC} + Q_{FB} + Q_{CF},$$

où :  $Q_{HT}$  est la chaleur ajoutée à l'eau d'alimentation dans les générateurs et les réchauffeurs. Elle est calculée avec l'enthalpie ajoutée à l'eau d'alimentation et au deuxième stage de préchauffage où elle s'évapore.

$Q_M$  est la chaleur rejetée par les échangeurs de chaleur du modérateur.

$Q_{SC}$  est la chaleur rejetée par les échangeurs de chaleur des boucliers d'extrémité.

$Q_{FB}$  est la chaleur rejetée par refroidisseur de soutirage.

$Q_{CF}$  représente les différentes sources constantes de chaleur, notamment la perte dans la tuyauterie, la chaleur ajoutée par les pompes du circuit caloporteur et les pertes occasionnées par la mise à l'atmosphère de la chaudière.

La valeur du bilan thermique est établie par les calculateurs de régulation numérique.

### 3.1.3 Puissance du réacteur et différences de température

Certains réacteurs sont conçus pour permettre l'ébullition du caloporteur dans certains canaux — les canaux bouillants. Les canaux de certains autres réacteurs sont sous-refroidis en tout temps. L'ébullition accroît partiellement le transfert de chaleur et refroidit donc mieux le combustible. Nous en discuterons plus loin. Un mélange de vapeur et d'eau transporte plus de chaleur qu'un fluide monophasique. Les calculs démontrent qu'à la sortie d'un canal, un liquide saturé dont la température s'est élevée de 61 °C pour atteindre 311 °C et dont la pression est de 10 MPa, contient 16,5 % moins de chaleur qu'un fluide dans les mêmes conditions dont la fraction de vapeur serait de 4 %.

Si une certaine évaporation améliore le transfert de chaleur, trop le réduit. Si l'ébullition du caloporteur est permise, elle devra être limitée. De plus, il est difficile d'évaluer les changements de puissance ou de détecter la réduction du débit dans un canal bouillant. Si la puissance ou le débit d'un canal augmentent, la température du canal ne variera pas. L'augmentation du titre de vapeur est difficile à détecter. Dans un canal non bouillant, on peut calculer le débit de chaleur comme suit :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T .$$

Toutefois, dans un canal bouillant, la différence de température,  $\Delta T$ , sera constante d'un bout à l'autre du canal, jusqu'à ce que tout le liquide s'évapore. Ainsi, on devrait écrire :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h .$$

### 3.1.4 Récapitulation des notions fondamentales de la puissance thermique du réacteur

- La puissance thermique du réacteur est la somme de la puissance du flux neutronique, de la puissance de la chaleur produite par la désintégration atomique et de la puissance de la chaleur des pompes, moins la puissance thermique perdue en majorité dans le modérateur.
- La relation entre la puissance thermique et les facteurs susmentionnés n'est pas linéaire.
- En pleine puissance, 93 % de la chaleur provient du flux neutronique, 6 % de la désintégration radioactive et 1 % de la chaleur des pompes. Environ 5 % de cette chaleur est perdue dans le modérateur. Le fluide caloporteur évacue environ 95 % de la puissance.

- Immédiatement après l'arrêt d'un réacteur, la principale source de chaleur est la désintégration radioactive. Après quelques heures, la chaleur due au pompage devient prédominante.
- Le transfert de chaleur au fluide caloporteur dépend:
  - du débit massique du fluide caloporteur,
  - de la différence de température entre l'entrée et la sortie, pour les canaux non bouillants,
  - de la différence d'enthalpie spécifique entre l'entrée et la sortie, pour les canaux bouillants.

### **3.2 LES MODES DE REFROIDISSEMENT DU COMBUSTIBLE**

Quand le réacteur est en production, la gaine du combustible est chauffée sur un côté par le combustible et refroidie de l'autre par le fluide caloporteur. On appelle flux thermique, le taux de transfert de chaleur par aire unitaire de la gaine de combustible. Il est mesuré en  $\text{kW/m}^2$ . Dans un réacteur CANDU, le flux thermique varie d'un endroit à l'autre, selon l'intensité locale du flux neutronique. L'intensité du flux thermique a un effet important sur la sûreté des réacteurs et sur comment le caloporteur refroidit la gaine de combustible.

#### **3.2.1 Les modes de transfert de la chaleur**

Pour comprendre comment diverses conditions de production affecteront la sûreté du réacteur, nous présentons les effets du flux thermique sur la température de la gaine de combustible, en fonction de la température de saturation du caloporteur et du mode de refroidissement.

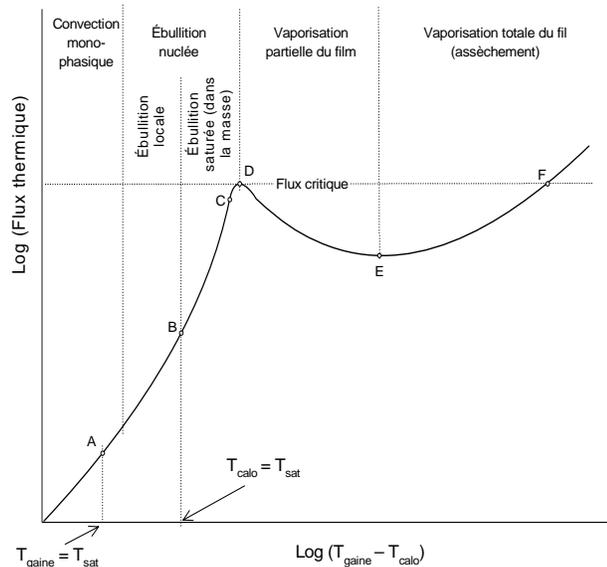
Au départ, nous devons poser les hypothèses simplificatrices suivantes :

- le flux thermique est uniforme le long du canal,
- le débit du caloporteur entretenu par les pompes du circuit caloporteur est normal,
- la pression du caloporteur et la température du collecteur d'entrée du réacteur sont maintenues à leur valeur normale.

Nous discuterons plus tard de l'effet des distributions normales et anormales du flux et de diverses anomalies dans les conditions du fluide caloporteur.

Par souci de simplicité, nous fixerons notre attention sur la sortie du canal. En outre, nous supposerons que la chaleur provient d'un unique crayon de combustible s'allongeant d'une extrémité à l'autre du canal. Au point qui nous occupe, le fluide caloporteur contient une quantité maximale de chaleur.

La figure 3-3 montre la relation entre le flux thermique, la température de la gaine de combustible et les différents modes de refroidissement.



**Figure 3-3**  
**Courbe du flux thermique en fonction de la température**

Si le flux thermique est peu élevé, le fluide caloporteur est sous-refroidi et la chaleur est évacuée par convection forcée monophasique. À une valeur donnée de flux thermique, la température de la gaine atteint la température de saturation du caloporteur, mais le fluide reste sous-refroidi (point A de la figure 3-3).

Avec l'augmentation de la puissance, le flux thermique s'accroît, tout comme la température de la gaine. Bien que la température de la gaine dépasse légèrement la température de saturation, il n'y a pas d'ébullition. Dans ces conditions, le liquide sous-refroidi évacue rapidement la chaleur produite par le combustible. Cependant, avec l'élévation de la température de la gaine qui suit l'augmentation de puissance, on peut observer l'apparition d'ébullition nucléée.

Cette ébullition est caractérisée par l'apparition de bulles à des sites de nucléation particuliers à la surface de la gaine. Ces sites de nucléation sont des imperfections microscopiques comme des creux ou des éraflures.

Le fluide caloporteur en contact avec ces sites est saturé, mais la masse du liquide reste légèrement sous-refroidie. À cause de leur flottabilité et des forces exercées par le déplacement du liquide, les bulles migrent de la surface et se mélangent au liquide. Le liquide plus froid entre donc en

Notes

contact avec la surface de la gaine, ce qui augmente le coefficient de transfert convectif.

Le liquide éloigné de la gaine est légèrement sous-refroidi, les bulles de vapeur se condensent donc. Puisque le liquide recevra la chaleur latente des bulles, sa température s'élèvera. Tant que la température de la masse du fluide caloporteur reste sous sa température de saturation, on parle d'ébullition nucléée locale.

Quand la température de la masse du caloporteur atteint la température de saturation (point B de la figure 3-3), les bulles produites ne se condensent plus. À partir de ce point, on parle d'ébullition nucléée saturée ou d'ébullition dans la masse.

Si on continue à augmenter la puissance, l'ébullition devient plus vigoureuse. Dans ces conditions, le transfert de chaleur par convection devient de plus en plus efficace. Il atteint un maximum et commence à diminuer. On observe cette diminution, parce que la portion de caloporteur sous forme liquide près de la surface de la gaine diminue progressivement, alors que son titre en vapeur augmente. Puisque la vapeur transfère moins efficacement la chaleur que le liquide, le coefficient de transfert de chaleur commence à diminuer (point C de la figure 3-3).

(On appelle cette condition ébullition nucléée excessive. Dans ces conditions, une petite augmentation du flux thermique peut causer l'assèchement et provoquer la rupture de la gaine.)

Si l'on continue à augmenter la puissance, l'on atteint le flux thermique le plus élevé (point D de la figure 3-3) pouvant être évacué par l'ébullition nucléée. On appelle ce point : flux thermique critique (FTC).

Passé ce point critique, un accroissement, même léger, du flux thermique provoquera la coalescence des bulles et engendrera un film de vapeur instable sur certaines parties de la gaine. Ce film de vapeur se dissociera, sera remplacé par une ébullition violente et se rétablira, mais pas nécessairement au même endroit. L'ébullition nucléée ne se produit plus, on parle de vaporisation partielle du film.

Dans cette situation, moins de chaleur est transférée par convection, mais la contribution du rayonnement thermique commence à être importante.

Or, la température est encore trop basse pour que le rayonnement soit vraiment efficace, le débit thermique diminue donc.

Le combustible produit alors plus de chaleur que ce que peut évacuer le fluide caloporteur. Cette chaleur sera absorbée dans le combustible et sa gaine produisant une augmentation fulgurante de leur température. Cette augmentation entraîne une production accrue de vapeur laquelle diminue

davantage le débit thermique et augmente encore plus la température du combustible et de la gaine de combustible.

Dans ces conditions, on atteint rapidement un point où la gaine n'est plus en contact avec un liquide, mais est plutôt complètement couverte par un film de vapeur (point E de la figure 3-3). Bien que l'interface liquide-vapeur soit très turbulente, ce film est stable et recouvre la gaine sans interruption.

La vapeur en contact avec la gaine est surchauffée. La vapeur chaude et la chaleur rayonnée de la gaine évaporent le liquide avant qu'il puisse percer le film et toucher la surface de la gaine. On parle de vaporisation totale du film. Le flux thermique de la gaine est toujours inférieur à la chaleur produite, l'élévation de sa température se poursuit.

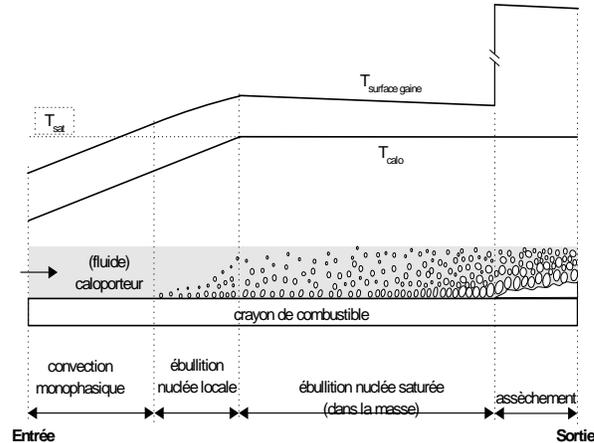
Avec l'augmentation de la température de la gaine, le rayonnement s'accroît et devient le mode prédominant de transfert de chaleur. À partir de ce point, le flux thermique continue d'augmenter jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre thermique. Cette situation est représentée par le point F de la figure 3-3.

La transition de l'ébullition nucléée maximale (point D) à la vaporisation totale du film (point F) est très rapide. Elle ne prend que quelques secondes, puisque la masse et, donc, la capacité calorifique d'un crayon de combustible sont très faibles.

Lorsque l'équilibre thermique est rétabli, la chaleur est évacuée au prix de températures extrêmes pour le combustible et sa gaine. Ces températures extrêmes peuvent provoquer la fusion de l'axe du crayon de combustible et endommager sa gaine. Nous en détaillons les conséquences dans la section 3.3.

Nous avons considéré le bout d'un crayon de combustible idéalisé. Nous allons maintenant étudier ce qui se passe en amont. Si le flux thermique est suffisamment élevé pour produire une vaporisation complète du film à la sortie du canal, d'autres modes de refroidissement sont en action dans le canal. Ils sont illustrés à la figure 3-4. Dans ce cas, nous avons présumé que la pression du fluide, son débit et sa température à l'entrée du canal étaient normaux. Nous continuerons de supposer que le flux thermique est constant le long du canal. L'effet de ces hypothèses deviendra apparent plus loin.

Notes



**Figure 3-4**  
**Variation des températures et modes de refroidissement**  
**le long d'un crayon de combustible**

On peut, à partir de la figure 3-4, faire les observations suivantes :

- L'écart de température entre le caloporteur et la gaine se réduit après le début de l'ébullition. Comme nous l'expliquons plus haut, cette diminution est causée par la hausse du coefficient de transfert convectif.
- La température de saturation tombe à mesure que l'on progresse dans le canal. Cette baisse est liée aux pertes frictionnelles, donc aux pertes de pression.
- À la fin de la phase d'ébullition nucléée saturée, la température de la gaine de combustible augmente soudainement. Au même moment, il y a formation d'un film de vapeur ce qui diminue le transfert de chaleur.
- L'équilibre thermique est rétabli lorsque la température de la gaine atteint sa valeur maximale.
- Il y a assèchement, lorsque des poches de vapeur sèches se déposent sur la gaine de combustible.

Le lecteur devrait également noter que l'assèchement se produit quand le flux thermique excède le flux thermique critique. Lorsque le flux thermique s'approche du flux thermique critique, il y a risque pour le combustible. À partir de ce point, le caloporteur est en ébullition nucléée excessive. On utilise le qualificatif d'excessif, parce qu'un changement minime du flux thermique — causé par un chargement de combustible en marche, un transitoire xénon, etc. — peut rapidement causer l'assèchement du combustible et son endommagement.

### 3.2.2 Le flux thermique critique et la puissance critique de canal

Pour prévenir l'assèchement du combustible, il est nécessaire de comprendre les principaux facteurs qui affectent le flux thermique critique : (1) le degré de sous-refroidissement du caloporteur, (2) le titre en vapeur du caloporteur (quand il y a ébullition) et (3) la vitesse, ou débit, du caloporteur.

**Le sous-refroidissement du caloporteur.** Plus le caloporteur est sous-refroidi, plus le flux thermique devra être élevé pour produire un film de vapeur. Donc, si le caloporteur est très sous-refroidi, le flux thermique critique sera très élevé. On appelle *marge de sous-refroidissement* (MSR) l'écart entre la température du caloporteur et sa température de saturation. Dans des conditions normales, la marge de sous-refroidissement typique à l'entrée se situe entre 40 et 50 °C.

**Le titre en vapeur.** Moins de chaleur est nécessaire pour former un film de vapeur, si le caloporteur entrant dans le canal contient déjà de la vapeur. Ainsi, la valeur du flux thermique critique diminue alors qu'augmente son titre en vapeur.

**Le débit du caloporteur.** Il y a davantage de convection si le fluide s'écoule plus rapidement. Donc, plus grande est la vitesse, plus élevé sera son flux thermique critique.

Considérons maintenant ce qui arrive au caloporteur traversant un canal, en situation réelle.

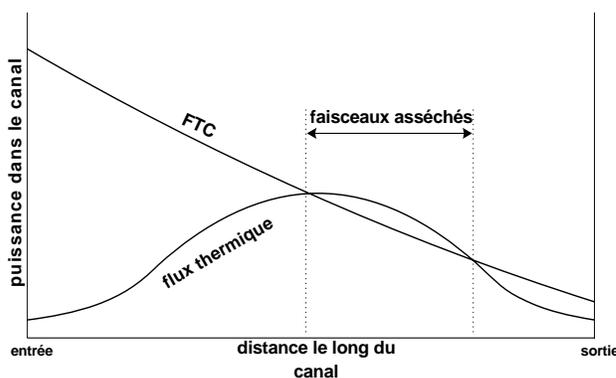
Dans un canal, la valeur du flux thermique critique s'abaissera progressivement vers la sortie, parce que le caloporteur est de moins en moins sous-refroidi et, dans certains cas, son titre en vapeur augmente. La variation du sous-refroidissement du caloporteur et celle de son titre en vapeur, le long du canal dépendent de la pression du caloporteur, de son débit, de la température à l'entrée et de la courbe du flux thermique. En fonctionnement normal, la courbe du flux thermique est toujours plus basse que celle du flux thermique critique. Toutefois, en présence d'anomalie, les deux courbes peuvent se croiser, comme le montre la figure 3-5.

La figure montre la courbe simplifiée du flux thermique. Elle ne montre pas les baisses locales de flux causées par les dispositifs de contrôle de la réactivité comme les barres d'absorption ou les compartiments de zones liquides.

On devra noter que l'assèchement peut être limité à un seul endroit d'un canal. Par exemple, le flux thermique à un point du canal peut excéder le flux thermique critique alors qu'il y sera inférieur plus en aval dans le

Notes

canal. Ceci se produit lorsque le flux thermique produit dans un faisceau plus en aval dans le canal n'est pas suffisant pour entretenir un film d'ébullition. En d'autres mots, le débit turbulent du caloporteur brise le film de vapeur qui existait sur les faisceaux asséchés ce qui permet au caloporteur de mouiller la gaine des faisceaux en aval.



**Figure 3-5**  
**Assèchement dans un canal de combustible**

Avant de passer à la section suivante, le lecteur devrait noter que :

L'assèchement ne se produit pas simultanément sur toute la surface d'un faisceau de combustible. En particulier, le flux neutronique et, donc, le flux thermique varient le long du faisceau et de son centre vers l'extérieur. En outre, le débit du caloporteur est inégalement réparti sur la section du faisceau, certaines pastilles de combustibles reçoivent la part du lion du débit. Les courbes de flux thermique et de flux thermique critique montrées aux figures 3-5 et de 3-9 à 3-14 représentent des situations extrêmes. Le lecteur devrait noter qu'en cas d'anomalies dans l'écoulement du caloporteur, l'assèchement pourra se produire même si le réacteur n'est chauffé que par la désintégration radioactive.

Il existe d'autres scénarios d'assèchement. Si, par exemple, le débit du canal est très bas, la vapeur et l'eau peuvent se stratifier et ainsi les crayons de combustibles plus élevés seront baignés dans la vapeur (il y aura assèchement) alors que les autres seront plongés dans l'eau.

Il convient de distinguer « assèchement » et « vidage » du caloporteur. Ils ne sont pas synonymes. Le vidage est un cas limite de l'assèchement. On parle d'assèchement lorsqu'un mince film de vapeur sépare le liquide caloporteur de la gaine de combustible. On parle de « vidage » lorsque le film de vapeur occupe tout l'espace disponible.

Enfin, nous définissons la puissance critique de canal (PCC) comme la puissance minimum d'un canal où un point quelconque du canal atteindra le flux thermique critique. Tout comme pour le flux thermique critique, la

puissance critique de canal n'a pas une valeur fixe. Elle varie en fonction de la puissance des faisceaux, de la distribution de flux ou des conditions du caloporteur dans le canal. Lors de la formation spécifique pour une centrale, on discutera abondamment de la puissance critique de canal.

### 3.2.3 Ébullition du caloporteur

Dans la section précédente, nous avons appris que l'ébullition nucléée locale rend plus efficace la convection de chaleur des gaines de combustible au caloporteur. Donc, un débit donné du caloporteur peut absorber une augmentation de la puissance dans le canal.

L'ébullition du caloporteur présente aussi des désavantages.

Premièrement, l'ébullition nucléée excessive réduit la marge avant d'atteindre l'assèchement. À l'extrême, elle peut conduire à l'assèchement.

Deuxièmement, pour un écart donné de pression à l'entrée et à la sortie du réacteur, le débit thermique du canal diminuera si le titre en vapeur du caloporteur augmente. Cette baisse résulte de la résistance accrue à l'écoulement. La résistance à l'écoulement est affectée par deux facteurs majeurs : la vitesse du fluide et la viscosité du caloporteur. Lorsque le caloporteur commence à bouillir, son volume s'accroît énormément. L'accroissement du volume se traduit par une vitesse plus élevée. Puisque les pertes par friction sont proportionnelles au carré de la vitesse, la résistance à l'écoulement s'accroît beaucoup.

La viscosité de la vapeur est inférieure à celle de l'eau, donc la résistance à l'écoulement diminue. Toutefois, l'effet de la vitesse est plus important. En conséquence, l'ébullition du caloporteur a comme effet final l'augmentation de la résistance à l'écoulement ce qui réduit le débit dans le canal.

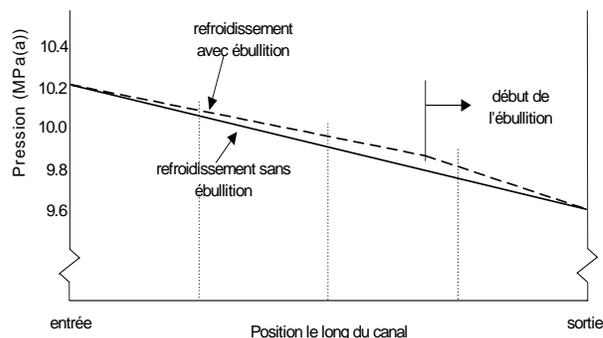
Il existe une règle empirique simple, mais assez précise : pour une différence de pression constante entre l'entrée et la sortie du canal, le débit diminuera d'environ 1 % pour chaque 1 % de la masse sous forme de vapeur, à la sortie du canal.

Dans les canaux de réacteurs conçus pour l'ébullition du caloporteur, le caloporteur contient peu de vapeur à la sortie. Les effets notés précédemment ne seraient donc pas importants.

Toutefois, sous certaines conditions anormales, le caloporteur à la sortie du canal peut contenir une grande quantité de vapeur. Dans de telles conditions, la réduction consécutive du débit peut nuire au refroidissement

Notes

du combustible. La figure 3-6 montre deux courbes de pression dans un canal non bouillant et un canal bouillant.



**Figure 3-6**

### Évolution de la pression le long de canaux bouillants et non bouillants

Dans les canaux non bouillants, la baisse de pression le long du canal est presque linéaire. Dans les canaux bouillants, la baisse est linéaire jusqu'au point où le caloporteur commence à bouillir. Une fois l'ébullition amorcée, la pression diminue plus rapidement.

Pour prévenir l'ébullition intempestive dans un canal de combustible, on applique des limites à sa puissance. Ces limites sont fixées pour empêcher l'assèchement d'un élément de combustible. En outre, on limite la puissance totale du réacteur. Cette puissance ne peut jamais excéder la capacité des générateurs de vapeur et des puits de chaleur.

#### 3.2.4 Récapitulation des notions fondamentales du refroidissement du combustible

Si le caloporteur ne contient pas de vapeur, la chaleur sera transférée de la gaine de combustible au caloporteur par convection monophasique.

Si la température de la gaine de combustible s'élève au-dessus de la température de saturation, il y aura une ébullition nucléée locale (liquide sous-saturé). Dans ces conditions, la masse du caloporteur est sous-refroidie. Les bulles de vapeur apparaissent à des sites de nucléation distincts et se condensent dans le liquide sous-refroidi. La turbulence créée dans le liquide par la vapeur accroît le transfert convectif de chaleur.

Si la température de la gaine continue de s'élever, la température de la masse du caloporteur atteindra la température de saturation. À ce point, l'ébullition nucléée saturée — l'ébullition dans la masse du caloporteur — commence et les bulles de vapeur produites ne se condensent plus.

Si l'on augmente encore la puissance, l'on produit une telle quantité de vapeur que le liquide atteint difficilement la gaine. Ceci limite le flux

thermique pendant l'ébullition nucléée. On appelle flux thermique critique (FTC), le flux thermique maximum que l'on peut transférer en condition d'ébullition nucléée.

Une fois ce point passé, toute augmentation du flux thermique se traduit par une *crise* du transfert de chaleur. Ce flux thermique diminue alors que les bulles de vapeur s'amalgament et forment un film de vapeur instable. Ce film se dissocie et se reforme, mais pas nécessairement au même endroit. On appelle ce phénomène, vaporisation partielle du film.

Puisque le combustible produit plus de chaleur que ce que le film peut transférer, les températures du combustible et de sa gaine augmenteront soudainement. Dans ces conditions, un film de vapeur stable s'installe rapidement sur toute la surface de la gaine.

Pendant l'ébullition partielle du film, le transfert convectif de chaleur diminue. Au même moment, le transfert par rayonnement s'accroît, à cause de l'augmentation de la température de la gaine.

Il y a vaporisation totale du film, lorsque le film de vapeur devient stable. Le liquide qui tombe vers la gaine s'évapore avant d'entrer en contact. Les températures du combustible et de la gaine continuent à augmenter jusqu'à l'atteinte de l'équilibre, c'est-à-dire lorsque la production de chaleur est égale à l'évacuation de cette chaleur. À ce point, les températures sont si élevées qu'elles peuvent endommager le combustible ou sa gaine.

Il y a assèchement quand s'installe un film d'évaporation partielle ou totale. Ce phénomène apparaît quand le flux thermique effectif dépasse le flux thermique critique. Quand l'assèchement se produit, la sûreté du combustible est en danger.

La valeur du flux thermique critique s'élève avec l'augmentation du sous-refroidissement et de la vitesse du caloporteur. Elle descend avec l'augmentation de son titre en vapeur. Dans un canal de combustible, le flux thermique critique diminue à mesure que l'on s'approche de la sortie du canal. Dans un canal, la courbe du flux thermique critique est une fonction de la pression du caloporteur, de son débit, de la température à l'entrée et de la distribution du flux neutronique.

Même si, dans un canal, un faisceau est asséché, les faisceaux voisins peuvent ne pas l'être. Si tel est le cas, le flux thermique critique de ces régions sera inférieur au flux thermique critique.

On appelle puissance critique de canal (PCC) la puissance à laquelle le flux thermique critique est atteint à un point d'un crayon de combustible dans le canal. Tout comme le flux thermique critique, la puissance critique

Notes

de canal dépend de la pression du caloporteur, de son débit, de la température à l'entrée et de la distribution du flux neutronique.

L'expansion du volume causé par l'ébullition produit une augmentation de la vitesse du caloporteur. Cet accroissement de vitesse se traduit par une résistance accrue à l'écoulement, laquelle ralentit le débit. Le débit dans un canal diminue de 1 % pour chaque augmentation de 1 % du titre en vapeur du caloporteur.

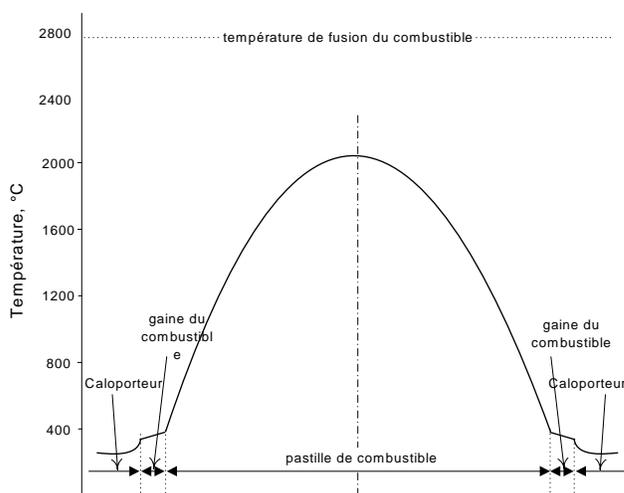
Il existe des limites de puissance indépendantes pour le réacteur, les canaux de combustible et les faisceaux de combustible.

### 3.3 COURBES DE TEMPÉRATURE DANS LE CŒUR DU REACTEUR

Dans les conditions normales de production, la distribution de température dans le cœur du réacteur est très étendue. Dans les régions les plus chaudes, comme dans l'axe du combustible, la température atteint près de 2 000 °C. La température s'élève du collecteur d'entrée au collecteur de sortie du réacteur. À la sortie, elle atteint approximativement 300 °C.

Pour assurer l'intégrité du combustible et prévenir les rejets radioactifs dans l'environnement, il est essentiel de maintenir la température des pastilles de combustible et de leur gaine dans des limites acceptables. Il faut obvier à la trop grande surchauffe du combustible.

#### 3.3.1 Courbe de température du combustible



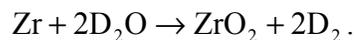
**Figure 3-7**  
**Courbe de température d'une pastille de combustible**

La figure 3-7 montre une courbe typique de la température du combustible et de la gaine dans des conditions normales. Elle illustre clairement la faible conductivité thermique du combustible céramique. Dans des conditions normales de caloportage, la température de l'axe de l'élément de combustible se situe entre 1900 et 2000 °C, alors que celle de sa gaine se situe entre 300 et 350 °C. On dispose d'une bonne marge de sûreté avant le bris de combustible, puisque les pastilles de UO<sub>2</sub> fondent entre 2700 et 2800 °C et leur gaine de zirconium entre 1800 et 1900 °C.

En pratique, la marge de sûreté est légèrement inférieure puisque le rayonnement abaisse la température de fusion et la ductilité de la gaine de combustible en zirconium.

Dans certaines conditions de production anormales, la température du combustible ou de sa gaine deviendra trop élevée : le combustible commencera à se liquéfier. On considère que la fusion du combustible est un bris de barrière, puisque le combustible fondu n'emprisonne plus les produits de fission gazeux comme l'iode. À l'extrême, le combustible fondu pourrait atteindre la gaine et la faire fondre. Dans ce cas, une deuxième barrière aura été brisée, et la radioactivité pourra pénétrer dans le circuit caloporteur primaire.

Surchauffer la gaine du combustible peut l'endommager, même si le combustible ou la gaine ne fondent pas. Aux températures élevées (dépassant 1100 °C), le zirconium de la gaine de combustible réagit rapidement avec la vapeur. La réaction indiquée ci-dessous produit de l'oxyde de zirconium, un matériau friable et du deutérium, un gaz explosif :



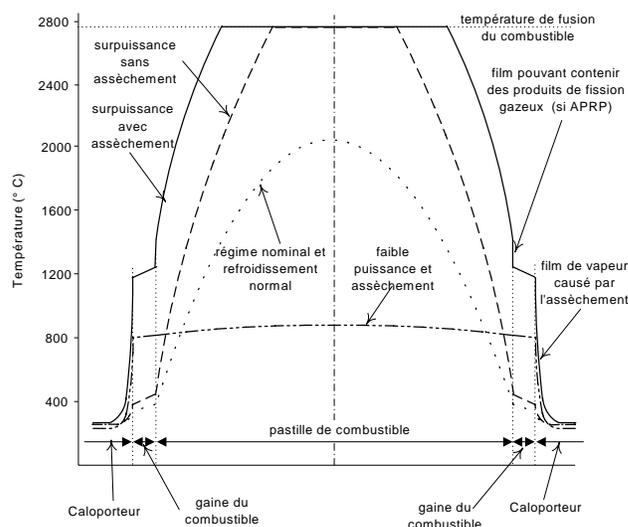
L'oxydation rapide du zirconium produit une quantité de chaleur comparable à celle générée par la désintégration radioactive. Cet apport de chaleur élève encore la température de la gaine. La combinaison de cette hausse de température et de la fragilisation de la gaine par l'oxydation et le rayonnement peut causer son bris.

Augmenter la température du combustible élèvera la pression dans la gaine, à cause de l'expansion des pastilles et des produits de fission gazeux. Dans ces conditions, la pression du caloporteur est habituellement plus forte et elle presse la gaine contre la surface du combustible. Ceci permet de maintenir une bonne conductivité thermique entre le combustible et sa gaine. Toutefois, en cas d'accident de perte de caloporteur (ou APRP : accident de perte de réfrigérant primaire), la pression du caloporteur peut devenir inférieure à la pression exercée par le combustible et les gaz chauds ce qui peut causer la rupture de la gaine, comme nous l'expliquons plus bas.

Notes

Les gaz libérés peuvent former un film mince entre le combustible et la gaine. L'effet isolant de ce film causera l'augmentation en palier de la température de la surface du combustible (cf. figure 3-8). Si la gaine n'a pas été trop oxydée ou fragilisée par le rayonnement neutronique, elle se gonflera, ce qui réduira la pression et empêchera le rejet de produits de fission.

Même s'il n'y a pas eu de rejet de produits de fission, il pourrait être difficile de retirer les faisceaux de combustible, à cause de leur déformation. Si la gaine était fragilisée, elle pourrait se fissurer et libérer des produits de fission dans le circuit caloporteur primaire. La description que nous venons de faire n'inclut pas tous les mécanismes d'endommagement, mais elle souligne l'importance de protéger à la fois le combustible et sa gaine des températures excessives et illustre les dommages qui pourraient survenir, même sans fusion du combustible et de sa gaine.



**Figure 3-8**  
**Courbes de température d'une pastille de combustible soumise à diverses conditions**

On peut grouper les diverses conditions qui peuvent causer la surchauffe du combustible en deux catégories : dépassement de capacité du combustible et refroidissement inadéquat. L'une ou l'autre peut causer la fusion du combustible ou l'assèchement, comme le montre la figure 3-8.

S'il n'y a pas d'assèchement, la chaleur est transférée du combustible au caloporteur par conduction et convection. Donc, les différents  $\Delta T$  — à travers la pastille, à travers la gaine et entre la gaine et le caloporteur — sont approximativement proportionnels à la puissance du faisceau.

Si un dépassement important existe près de l'entrée du canal, le combustible pourrait fondre sans qu'il y ait d'assèchement. La situation

est différente près de la sortie du canal, où le flux thermique est beaucoup plus proche du flux thermique critique. À cet endroit, l'assèchement précédera la fusion du combustible.

Comme nous le mentionnions plus haut, si le refroidissement est entravé, il pourra y avoir assèchement, même si la seule source de chaleur est la désintégration des produits de fission. Dans ce cas, même si la courbe de température à travers la pastille de combustible est plate, la gaine sera surchauffée. Toutefois, la fusion du combustible restera très improbable. Les analyses de sûreté indiquent qu'à ce bas niveau de production de chaleur, la fusion du combustible nécessiterait l'arrêt complet de l'écoulement du caloporteur, combinée à la panne totale du dispositif d'injection du système de refroidissement d'urgence et l'absence de refroidissement du modérateur. En fait, la chaleur de désintégration ne fondrait le combustible qu'à la suite de l'évaporation complète du modérateur (D<sub>2</sub>O).

### **3.3.2 La température du caloporteur et la courbe du flux thermique**

Nous pouvons maintenant examiner les cinq conditions anormales pouvant mener à la surchauffe du combustible. Les trois premières conditions — basse pression du caloporteur, bas débit du caloporteur et température élevée au collecteur d'entrée du réacteur — sont associées au refroidissement inadéquat du combustible. Les deux dernières conditions — excès de puissance du faisceau et excès de puissance du canal — sont associées à la trop grande production de chaleur par le combustible.

#### **Basse pression du caloporteur**

Une sous-pression soutenue du caloporteur peut résulter (a) d'un accident de perte de caloporteur ou (b) du mauvais fonctionnement du système de régulation de la pression d'entrée du circuit caloporteur primaire.

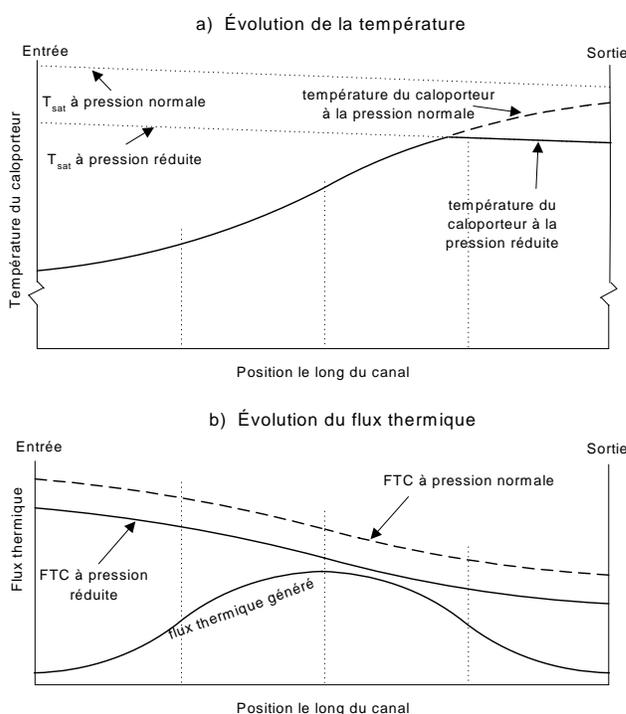
Par exemple : à cause d'une défaillance, les vannes d'alimentation peuvent fermer par défaut ou le robinet de décharge du pressuriseur peut s'ouvrir par défaut (ce fut la cause de l'accident tristement célèbre de Three Mile Island). Un rétrécissement du caloporteur peut causer une baisse transitoire de la pression, ce qui notamment peut arriver lors d'un arrêt brusque du réacteur. (Nous présentons plus bas d'autres causes de basse pression.)

La température de saturation du caloporteur tombera en cas de baisse de pression. Cette baisse réduit le sous-refroidissement, puisque l'ébullition du caloporteur se produira à une température plus basse. Si le caloporteur bout déjà, l'ébullition s'intensifiera.

Notes

Dans ces deux cas, le flux thermique critique diminue. Donc, si la pression décroît, la courbe du FTC descendra, ce qui pourrait provoquer l'assèchement.

Aux fins de simplicité, nous négligerons la réduction du débit dans le canal et le possible accroissement de la puissance thermique du combustible responsable de l'ébullition. Nous supposons également que la perte de pression n'est pas suffisante pour causer une cavitation dans les pompes du circuit caloporteur. Si l'on tient compte de ces hypothèses, la courbe de température du caloporteur ne changera pas avant que l'ébullition ne s'amorce. La figure 3-9 montre l'effet de la baisse de pression sur la température du caloporteur, sur la température de saturation et le flux thermique critique.



**Figure 3-9**  
**Effets de la basse pression du caloporteur**

À partir de la figure 3-9, l'on peut observer que la température de saturation descend à mesure que l'on progresse vers la sortie du canal. Cette baisse est grossièrement proportionnelle à la baisse de pression du caloporteur et aux pertes dues à la friction.

La perte de pression due à l'écoulement du caloporteur dans les passages restreints entre les éléments de combustible est importante — elle excède le mégapascal.

L'on doit également remarquer que la courbe de température du caloporteur augmente plus rapidement au centre du canal. Cela ne devrait pas nous étonner, puisque c'est au centre que le maximum de chaleur est générée. Incidemment, si nous négligeons l'usure du combustible, la puissance thermique du canal et donc son flux thermique sont directement proportionnels au flux neutronique.

Si le caloporteur bout à un point du canal, tous les points en aval seront en contact avec un mélange liquide-vapeur. Dans ce cas, la température du caloporteur diminuera jusqu'à la sortie du canal, à cause de la baisse de pression. L'injection d'énergie thermique dans le caloporteur par le combustible et, en moindre mesure, la chaleur générée par la friction feront augmenter le titre en vapeur. En outre, la baisse de pression provoquera l'évaporation instantanée du caloporteur. Même si le caloporteur ne bout pas dans le canal, il pourrait y avoir un peu d'évaporation instantanée, à cause de la baisse de pression au collecteur de sortie.

La baisse de la valeur du flux thermique critique d'un bout à l'autre du canal résulte de la réduction du sous-refroidissement et, possiblement, de la présence d'ébullition. En conditions normales, la marge d'assèchement est importante (entre 30 et 40 % du flux thermique). Toutefois, une chute de la pression du caloporteur pourra l'amenuiser. Dans la situation illustrée à la figure 3-9, il n'y a pas d'assèchement, mais on peut voir que les faisceaux sous fort bombardement neutronique, aux trois quarts du canal, sont presque asséchés.

### Débit réduit du caloporteur

La différence de pression du canal,  $\Delta p$ , et, donc, le débit dépend principalement des pressions aux collecteurs d'entrée et de sortie du réacteur. Plusieurs mécanismes peuvent réduire le débit du canal, notamment l'arrêt d'urgence des pompes du circuit caloporteur, la cavitation dans les pompes ou l'obstruction du canal.

Considérons ce qui pourrait arriver si nous réduisons graduellement le débit du caloporteur dans un canal non bouillant. Si cette baisse est graduelle, la quantité de chaleur produite par kilogramme de caloporteur augmentera, comme l'illustre l'équation suivante :

$$\rightarrow \downarrow \uparrow$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h.$$

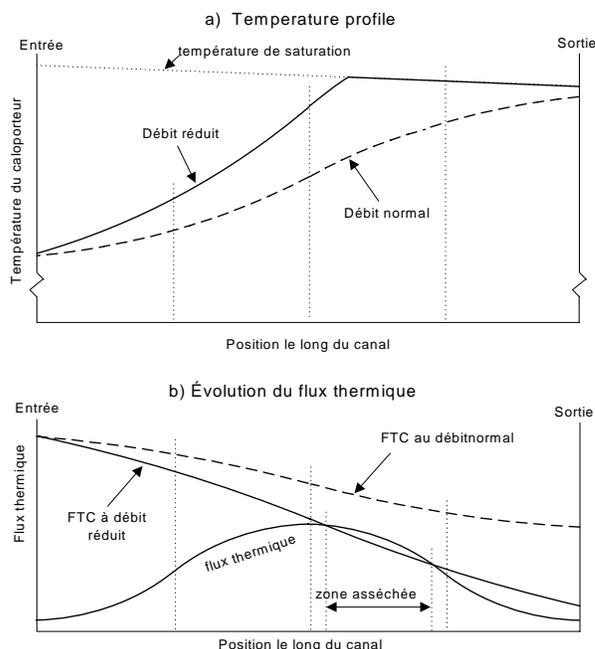
Ce qui se traduit à une augmentation plus rapide de la température du caloporteur dans le canal. À mesure que nous réduisons progressivement

Notes

le débit, l'ébullition nucléée locale apparaîtra au bout du canal et se transformera en ébullition nucléée saturée.

NOTE : Si la vitesse du caloporteur dans le canal est plus basse, moins de bulles seront emportées de la surface de la gaine, ce qui facilitera la formation d'un film de vapeur.

Si l'on continue à réduire le débit, l'ébullition se produira de plus en plus tôt dans le canal et le titre en vapeur augmentera progressivement.



**Figure 3-10**  
**Effets d'un débit réduit sur la température et le flux dans le canal**

Si le débit dans un canal est réduit, la température du caloporteur augmentera plus rapidement. Donc, il pourrait bouillir dans un canal non bouillant.

Le lecteur devrait remarquer que dans un canal bouillant, l'évaporation s'amorcera plus tôt, à cause de l'augmentation plus rapide de la température. Donc, le caloporteur en amont contiendra plus de vapeur.

L'effet combiné est la baisse progressive du flux thermique critique. Une ébullition importante produira une baisse de la vitesse du caloporteur liquide ce qui se traduira par une réduction supplémentaire du FTC.

Dans l'exemple de la figure 3-10, la courbe de flux thermique critique descend sous la courbe du flux thermique généré, ce qui se traduit par un assèchement local. Par souci de simplicité, nous supposons que le flux

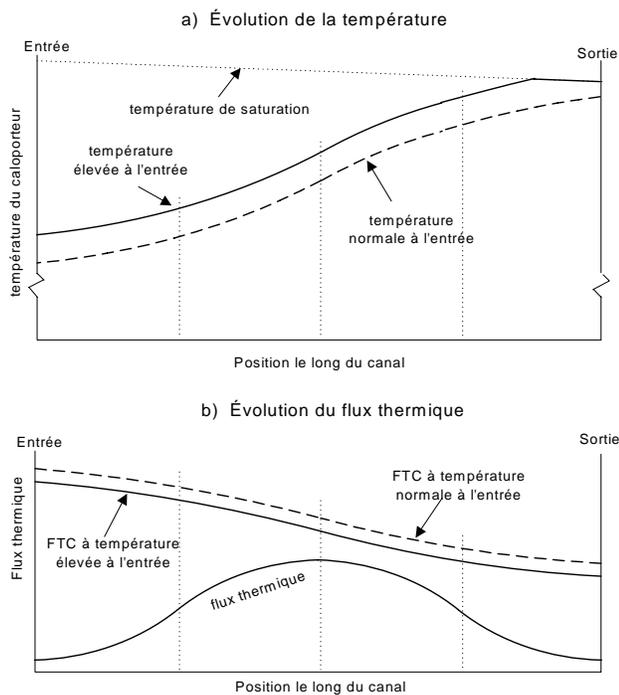
thermique (ou la puissance produite par faisceau) est constant, bien que la présence de vapeur abaisse l'absorption des neutrons.

### Température élevée au collecteur d'entrée

Dans la plupart des cas, la hausse de la température du caloporteur au collecteur d'entrée résulte d'une dégradation du transfert de chaleur dans les générateurs de vapeur. Cette dégradation peut avoir plusieurs causes :

- l'encrassement, l'obturation ou l'immersion incomplète des tubes du générateur de vapeur
- une fuite d'une plaque de séparation du générateur de vapeur
- une perte de l'eau d'alimentation de la chaudière
- l'excès de puissance thermique du réacteur ou la pression anormalement élevée dans le générateur de vapeur.

Une température trop élevée affectera tous les canaux alimentés par un collecteur d'entrée du réacteur. Il en résultera une augmentation de la température du caloporteur et du titre en vapeur à mesure que l'on progresse dans le canal. Le caloporteur pourrait bouillir dans des canaux non bouillants.



**Figure 3-11**

**Effets de l'élévation de la température au collecteur d'entrée sur la température et le flux thermique d'un canal**

Notes

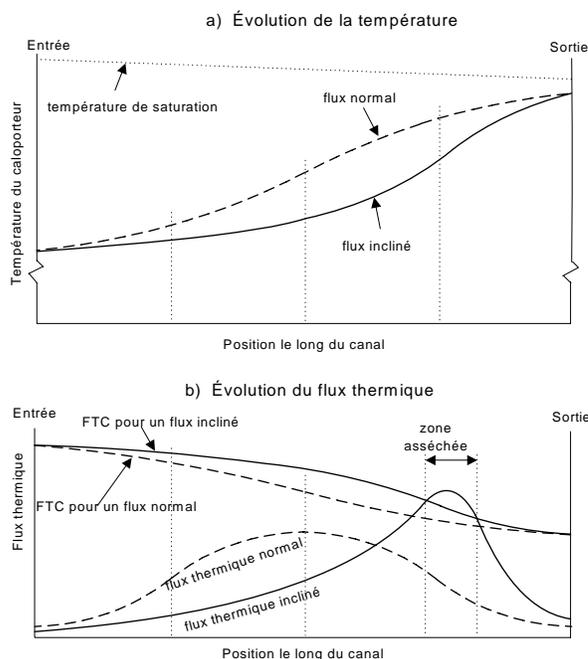
Dans les canaux bouillants, l'ébullition commencera plus tôt, ce qui augmente le titre en vapeur du caloporteur en aval. La valeur du flux thermique critique diminue en fonction inverse de la température du caloporteur à l'entrée. L'on doit noter qu'une forte élévation de la température produira un assèchement considérable.

### Excès de puissance de faisceau

Dans cette section, nous supposons que la puissance totale du canal est constante, bien que certains faisceaux produisent un excès de chaleur. Une telle situation peut découler d'une forte inclinaison du flux neutronique (qui peut résulter notamment d'une manœuvre d'alimentation fautive).

Dans cette discussion, nous supposons qu'à l'entrée, le débit du caloporteur, sa pression et sa température sont normaux. Puisque le canal produit la même puissance, la température du caloporteur à la sortie et, le cas échéant, son titre en vapeur seront constants. Cependant, les courbes de flux thermique, de température et de titre en vapeur du caloporteur changeront.

Examinons le cas où le flux neutronique est incliné vers la sortie du canal. On doit noter que puisque la puissance du canal est inchangée, l'aire est la même sous les courbes des flux thermiques normal et incliné.

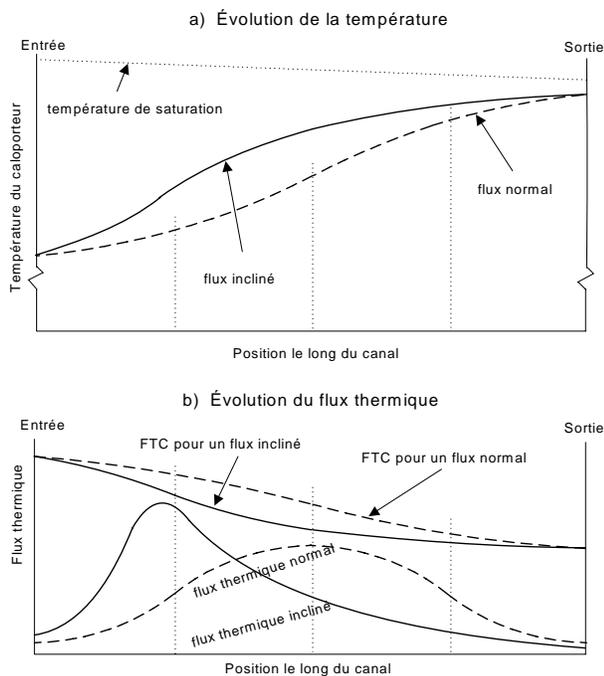


**Figure 3-12**  
**Canal dont le flux neutronique est incliné vers sa sortie**

La figure 3-12 nous indique que, localement, la montée de la température est proportionnelle à la montée du flux thermique.

Dans un canal bouillant, les conditions de saturation apparaissent plus tôt dans le canal, mais une fois l'ébullition amorcée, le titre en vapeur augmente rapidement. La température et le titre en vapeur du caloporteur sont moins élevés qu'en situation normale, quelle que soit la position le long du canal, hormis l'entrée ou la sortie. C'est pourquoi la courbe du flux thermique critique est légèrement plus élevée. Toutefois, le flux thermique généré des faisceaux produisant un surplus de puissance peut atteindre le flux thermique critique et le dépasser.

La courbe du flux du canal adjacent sera inclinée dans la direction opposée. Dans ce cas, la majeure partie de la puissance sera générée près de l'entrée du canal. Nous pouvons répéter l'énoncé que, localement, l'élévation de température est proportionnelle à l'élévation du flux thermique. Si nous avons considéré un canal bouillant, les conditions de saturation eussent été atteintes plus en aval. Toutefois, le titre en vapeur aurait augmenté moins vite jusqu'à sa valeur normale à la sortie du canal. Tout ceci nous permet de conclure que pour un flux incliné (vers l'entrée), la courbe du flux thermique critique est inférieure à la courbe normale, hormis les points d'entrée et de sortie.



**Figure 3-13**  
**Canal dont le flux neutronique est incliné vers son entrée**

Notes

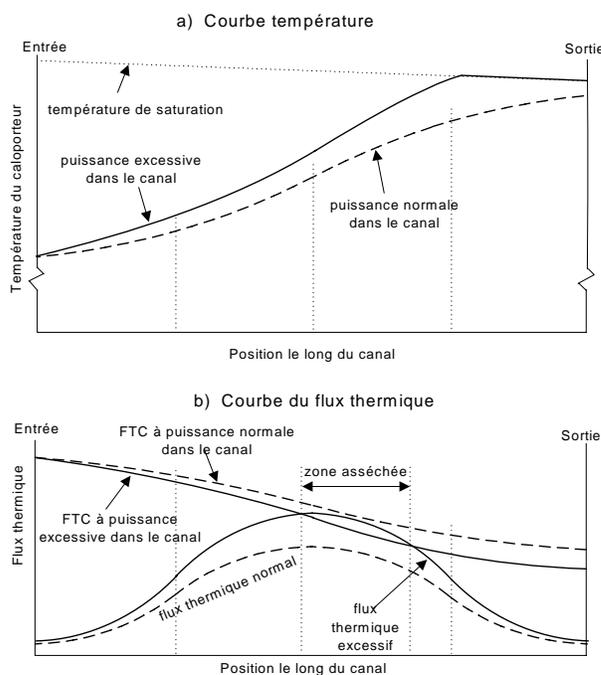
Il y a moins de risque d'atteindre le flux thermique critique, puisque les faisceaux de puissance élevés sont exposés à un caloporteur plus froid. Comme nous le disions plus haut, il existe un risque pour l'intégrité de ces faisceaux.

On ne devrait donc pas être étonné d'apprendre que des limites distinctes sont imposées, aux faisceaux et aux canaux. Ces limites protègent le réacteur en empêchant que la valeur du flux thermique atteigne ou dépasse le point critique en cas d'anomalie du flux.

### Excès de puissance dans les canaux

Pour ce scénario, nous supposons que le débit, la pression et la température au collecteur d'entrée du caloporteur sont normaux. Nous supposons également que le flux conserve sa forme symétrique habituelle, mais qu'il est plus intense.

Puisque chaque faisceau produit plus de chaleur, la température du caloporteur s'élèvera plus rapidement. Dans ces conditions, il pourrait bouillir. Dans les canaux bouillants, il bouillira davantage. L'augmentation de la température du caloporteur et de son titre en vapeur abaissera la courbe du flux thermique critique. Un assèchement local pourrait résulter de cette combinaison d'un flux thermique plus élevé et d'un flux thermique critique plus bas. (cf. figure 3-14.)



**Figure 3-14**  
**Effet d'un excès de puissance sur le canal**

### 3.3.3 Récapitulation des notions fondamentales sur les courbes de température dans le cœur du réacteur

S'il n'y a pas d'assèchement, la courbe de température du combustible et de sa gaine sera à peu près proportionnelle à la puissance du faisceau. Étant donné la faible conductivité thermique du combustible céramique, l'écart de température,  $\Delta T$ , dans la pastille de combustible sera élevé.

Un dépassement de la capacité ou l'assèchement peuvent provoquer une surchauffe excessive du combustible ou sa gaine, ce qui pourrait les endommager.

Les anomalies suivantes peuvent provoquer la surchauffe du combustible :

- basse pression du caloporteur,
- faible débit du caloporteur,
- température élevée au collecteur d'entrée du réacteur,
- excès de puissance d'un canal,
- excès de puissance d'un faisceau (causée par l'inclinaison du flux neutronique).

Une pression trop basse du caloporteur abaisse la courbe de température de saturation, ce qui réduit le sous-refroidissement du caloporteur dans les parties non bouillantes du canal.

Dans ces conditions, dans un canal non bouillant, le caloporteur pourrait bouillir et, dans un canal bouillant, le titre en vapeur pourrait s'élever. Ces changements peuvent provoquer un assèchement.

Si l'on réduit le débit du caloporteur, la température augmentera plus rapidement dans le canal. Tout comme dans le cas précédent, le caloporteur se réchauffe plus rapidement (il est moins en moins sous-refroidi) et s'il commence à bouillir, son titre en vapeur s'élèvera. L'abaissement de la courbe de flux thermique critique augmente le risque d'assèchement.

Si la température dans le collecteur d'entrée du réacteur est élevée, le caloporteur sera moins sous-refroidi. L'effet est analogue à celui d'une basse pression pour le caloporteur.

En cas d'inclinaison importante du flux neutronique, certains faisceaux de combustibles peuvent être surchauffés, même si la puissance thermique du canal demeure normale. Une forte inclinaison du flux vers la sortie du canal modère l'élévation de la température près de l'entrée du canal, puisque le flux est inférieur à sa valeur normale. Le sous-refroidissement du combustible est légèrement accru et, dans les canaux bouillants, l'ébullition se produira plus en aval. Donc, la courbe du flux thermique critique sera légèrement plus élevée. Cependant, la hausse de la courbe du

Notes

flux thermique des faisceaux surchauffés près de la sortie du canal, sera plus importante que celle de la courbe du FTC, ce qui pourrait provoquer l'assèchement des faisceaux en cause.

Si le flux neutronique est incliné vers l'entrée du canal, la température du caloporteur augmentera plus rapidement et, dans les canaux bouillants, l'ébullition commencera plus tôt. En conséquence, la courbe du flux thermique critique sera plus basse. Puisque les faisceaux sous forte charge sont plus rapprochés de l'entrée du canal, où le FTC est relativement élevé, il est possible que le combustible fonde, sans qu'il y ait assèchement.

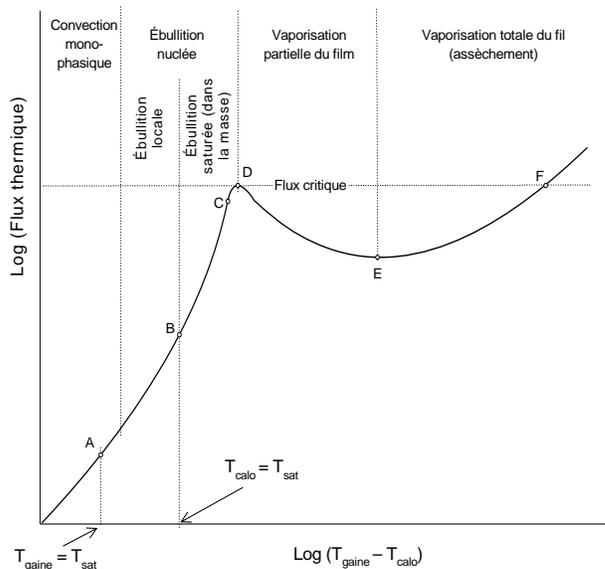
L'excès de puissance dans un canal encourage l'assèchement de deux manières :

- la courbe du flux thermique généré est plus haute
- la courbe du flux thermique critique est plus basse, puisque le caloporteur est moins sous-refroidi et son titre en vapeur plus élevé.

Cette hausse et cette baisse résultent de la chaleur supplémentaire absorbée, par kilogramme de caloporteur alors qu'il s'écoule d'un bout à l'autre du canal.

### 3.4 QUESTIONS DE RECAPITULATION – LE CIRCUIT CALOPORTEUR

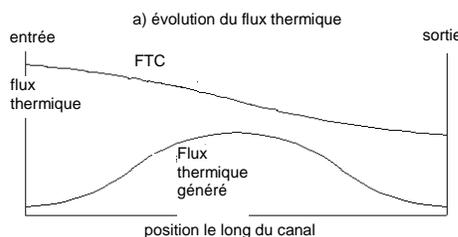
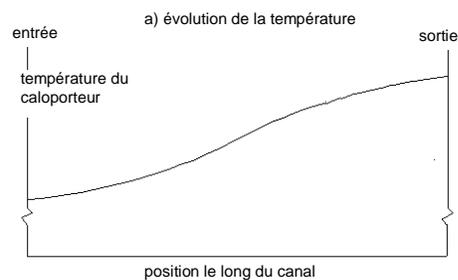
1. Soit un réacteur CANDU comportant des canaux bouillants. L'ébullition ne se produit qu'une fois que le réacteur a atteint 95 % de sa pleine puissance (PP). Supposons que vous mesuriez la température de sortie et le débit du caloporteur d'un canal bouillant. Qu'observeriez-vous si l'on lançait le réacteur et que sa puissance monte de 0 à 100 % PP ? Expliquez brièvement vos observations.
2. Voici la courbe de Log (*flux thermique*) en fonction de Log ( $T_{\text{gaine}} - T_{\text{calo}}$ ).



- a. Donnez le nom de chacune des régions du graphique énumérées et détaillez les principaux modes de transfert de chaleur de la gaine de combustible à la masse du caloporteur.
  - i. de l'origine à A
  - ii. de A à B
  - iii. de B à D
  - iv. de D à E
  - v. de E à F
- b. Définissez l'expression « flux thermique critique » et précisez le point de la courbe où le flux thermique critique est atteint.
- c. Définissez le mot « assèchement » et précisez les régions de la courbe où il se produit.

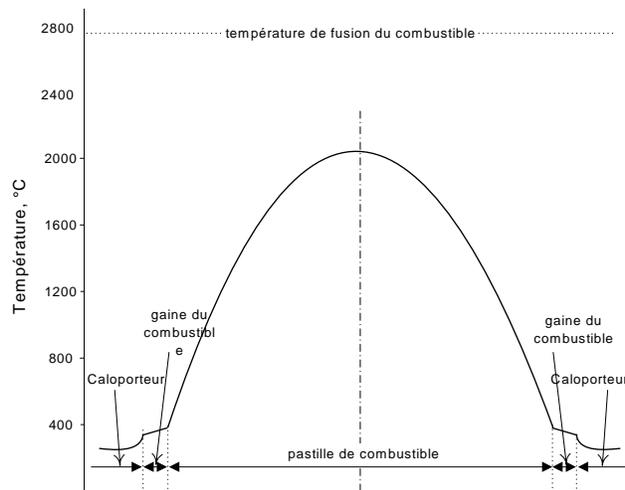
Notes

3. Décrivez l'assèchement dans un canal dont l'écoulement du caloporteur est biphasique.
4. Lors de l'assèchement, quel est le principal mode de transfert de chaleur du combustible au caloporteur ?
5. Définissez les expressions « flux thermique critique » et « puissance critique de canal ».
6. Énumérez les trois facteurs qui affectent le flux thermique critique dans un canal et expliquez leurs effets.
7. Il existe des limites sur la puissance des faisceaux, des canaux et de l'ensemble du réacteur. Quelle est leur utilité ?
8. Expliquez pourquoi le débit massique est moindre dans un canal bouillant.
9. Le dessin ci-dessous montre les courbes de température, de flux et de flux thermique critique d'un canal. Dessinez, pour chacune des conditions, les courbes de température, de flux thermique critique et du flux thermique. Indiquez les endroits du canal où l'assèchement s'amorcera, si les conditions sont suffisantes.
  - a) puissance élevée du réacteur
  - b) température élevée du collecteur d'entrée du réacteur
  - c) basse pression du circuit caloporteur
  - d) faible débit dans le canal
  - e) inclinaison du flux vers l'entrée
  - f) inclinaison du flux vers la sortie
  - g) basse température du caloporteur



10. Le graphique montre la courbe de température dans un crayon de combustible et le caloporteur.

- a. Expliquez la forme de la courbe.
- b. Expliquez quelle sera la forme de la courbe dans les conditions suivantes :
  - i. surproduction sans assèchement
  - ii. surproduction avec assèchement
  - iii. assèchement à basse puissance



## FONCTIONNEMENT DES ÉLÉMENTS DU CIRCUIT CALOPORTEUR

### 4.0 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit les processus thermodynamiques dans le cœur, les canaux et dans les faisceaux de combustible. Nous avons introduit les notions d'assèchement, de flux thermique critique et de puissance critique de canal. Nous avons expliqué pourquoi l'on imposait des limites à la puissance thermique du réacteur, des canaux et des faisceaux de combustible. Nous avons également expliqué pourquoi il était important de conserver la température et la pression du circuit caloporteur primaire en deçà de limites préétablies.

Avant de traiter des conditions anormales de fonctionnement, nous expliquons comment la pression du système caloporteur est régulée.

### 4.1 RÉGULATION DE LA PRESSION D'ALIMENTATION DU CIRCUIT CALOPORTEUR PRIMAIRE

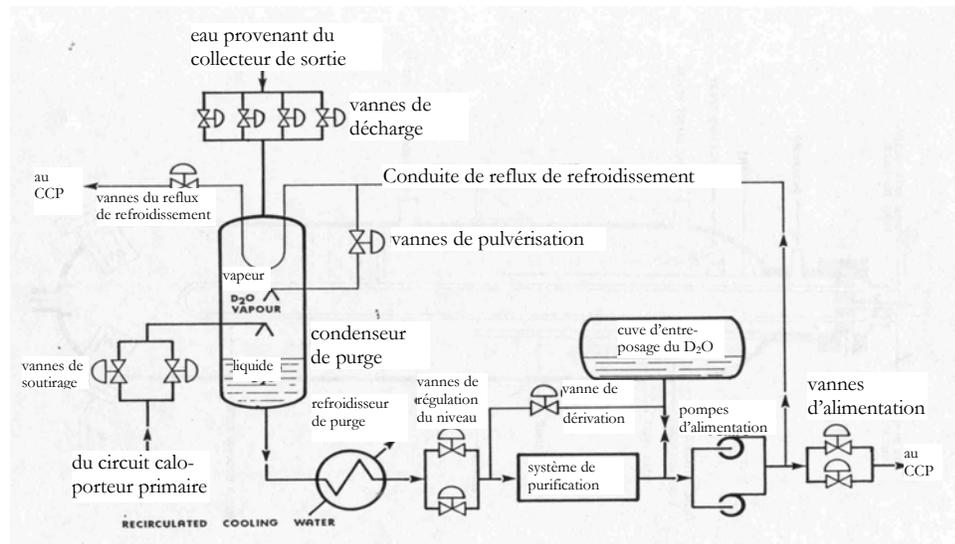
Il faut réguler la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire pour qu'elle reste à l'intérieur de certaines limites. Si nous les dépassons, nous mettons en jeu la sûreté du réacteur. Par exemple, une pression d'alimentation trop basse pour assurer un refroidissement suffisant du combustible pourrait conduire à l'apparition de cavitation dans les pompes du circuit caloporteur primaire et même une obturation par la vapeur.

Il existe deux systèmes de régulation de la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire des réacteurs CANDU. Certains réacteurs sont dotés d'un circuit d'alimentation et de purge. D'autres ont, en plus, un pressuriseur branché au circuit d'alimentation et de purge.

Il n'y a pas de canaux bouillants à la centrale de Pickering. On dit donc de son circuit caloporteur primaire qu'il est incompressible, puisqu'il n'y a pas de vapeurs compressibles. Tout changement de volume résulte de la dilation ou de la contraction du fluide caloporteur, qui dépend de la température. On a conçu ces systèmes de contrôle pour garder constante la température moyenne du caloporteur, lors de changement de puissance du réacteur. À ce titre, en conditions normales, le système d'alimentation et de purge assure la régulation de la pression d'alimentation du fluide du circuit caloporteur primaire.

La figure 4-1 illustre le fonctionnement du circuit d'alimentation et de purge. Le liquide est soutiré du système par des vannes de purge branchées aux collecteurs d'aspiration des pompes du circuit caloporteur

primaire. Pour maintenir la pression, des pompes de pressurisation alimentent le circuit caloporteur primaire.



**Figure 4-1**  
**Schéma du circuit d'alimentation et de purge de régulation de la pression**

Le liquide soutiré est dirigé vers le condenseur de purge. Puis, il passe au refroidisseur à soutirage avant de traverser un système de purification. Une fois purifié, des pompes de pressurisation renvoient le liquide dans le circuit caloporteur. Un grand réservoir d'eau lourde ( $D_2O$ ) est branché au circuit d'alimentation et de purge entre le système de purification et les pompes d'alimentation. Ce réservoir a les fonctions suivantes :

- réserve d'eau lourde en cas de fuite,
- compensation de la dilation et de la contraction du fluide caloporteur,
- l'apport d'une charge d'aspiration positive nette aux pompes de pressurisation.

À l'équilibre, les pressions d'alimentation dans le circuit caloporteur sont stables et le débit d'alimentation est égal au débit de purge.

On devrait noter que le condenseur de purge n'est qu'un échangeur de chaleur à condensation de vapeur. Puisque les présentations sont faites, nous pouvons examiner le fonctionnement du circuit.

## 4.2 LE CONDENSEUR DE PURGE

Le liquide soutiré, à la température du fluide caloporteur, tombe dans le condenseur de purge où il s'évapore instantanément. Le condenseur retire la

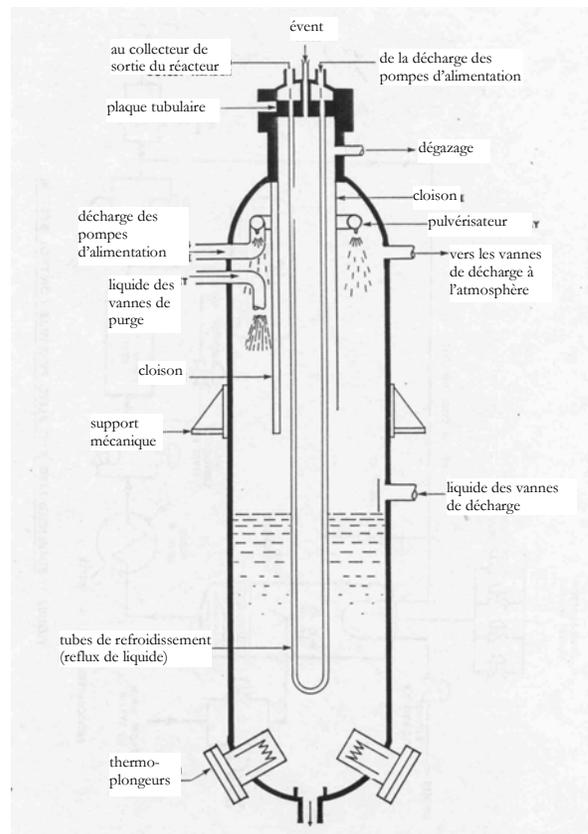
Notes

chaleur latente du liquide caloporteur et, ce faisant, le fait passer de la phase vapeur à la phase liquide.

On maintient le condenseur de soutirage à une pression préétablie en ajustant le débit du reflux d'eau lourde froide circulant dans le tube de refroidissement du condenseur. (cf. figure 4-2.) Toutefois, si la pression est très supérieure à la pression préétablie, de l'eau lourde refroidie sera pulvérisée directement dans le condenseur. Cette pulvérisation condense efficacement les vapeurs qu'il contient et, ainsi, abaisse rapidement la pression du condenseur de soutirage.

Bien qu'elle soit très efficace, la pulvérisation n'est utilisée que comme système auxiliaire du refroidissement normal basé sur le reflux d'eau lourde, pour deux raisons :

- pour éviter d'augmenter la charge sur le système de purification puisqu'il devra recycler de l'eau déjà purifiée
- pour éviter d'accroître la concentration de gaz non condensables dans le condenseur de soutirage.



**Figure 4-2**  
**Le condenseur de purge**

Le condenseur de purge permet aussi de *soulager* le circuit caloporteur primaire. Si la pression d'alimentation du circuit caloporteur est anormalement élevée, des vannes de décharge motorisées s'ouvrent et pulvérisent le fluide caloporteur directement dans le condenseur de soutirage. Le condenseur de soutirage est doté de vannes de décharge qui, à leur tour, le protègent des surpressions.

#### **4.2.1 Les gaz non condensables dans le condenseur de purge**

Des gaz non condensables peuvent pénétrer dans le condenseur de purge par le pulvérisateur de refroidissement. Comme nous le disions plus haut, dans les conditions normales, le liquide s'évapore instantanément. La présence de gaz non condensables dans un échangeur de chaleur par condensation de vapeur présente deux inconvénients :

- ils réduisent localement le transfert de chaleur,
- ils accroissent la pression de la vapeur, donc sa température.

Le profil de température du condenseur dépend de sa conception. Dans un condenseur à turbine, la température la plus élevée est au sommet et la plus basse au point où l'air est retiré. C'est à ce point que la concentration de gaz non condensables sera la plus élevée.

Dans un condenseur de purge, les gaz non condensables s'accumulent au sommet du récipient. Or, la loi de Dalton dicte que la pression de vapeur la moins élevée se situe là où les gaz non condensables exercent la pression la plus élevée — c'est-à-dire au sommet.

Si les gaz non condensables recouvrent le tube, le taux de transfert de chaleur au fluide caloporteur diminuera, et la pression et la température s'élèveront dans le condenseur. En réponse à cette hausse de pression, le débit de reflux du caloporteur augmentera.

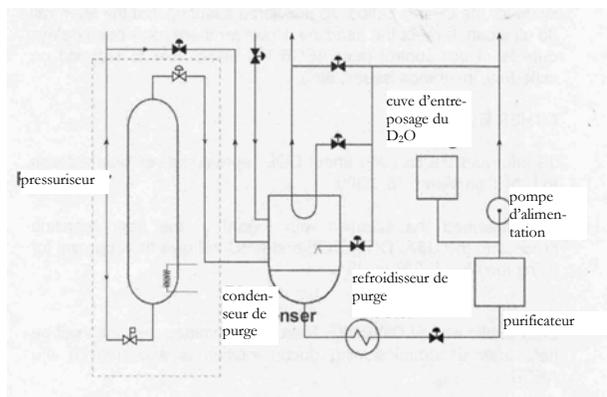
Toutefois, si les gaz non condensables continuent à s'accumuler, le débit du reflux maximum ne pourra plus contenir l'augmentation de pression et de température. Ce point atteint, les vannes du pulvérisateur du liquide de reflux s'ouvriront. Puisque cette action présente les inconvénients exposés plus haut, la seule solution viable reste l'élimination des gaz non condensables. C'est la fonction de l'évent de dégazage.

Avant de poursuivre, le lecteur devrait noter qu'une accumulation importante de gaz non condensables diminue effectivement le coefficient de transfert de chaleur et, donc, l'efficacité du transfert de chaleur de ce système d'échange de chaleur.

### 4.3 LE PRESSURISEUR

Les centrales de Bruce et de Darlington sont dotées d'un pressuriseur (figure 4-3). Le pressuriseur est un grand récipient vertical dans lequel un volume, situé au-dessus du niveau d'eau saturé, reçoit la vapeur. Le niveau préétabli de l'eau monte avec l'augmentation de la puissance du réacteur.

Le pressuriseur peut compenser les variations du volume du caloporteur dues aux manœuvres de puissances et aux phénomènes transitoires.



**Figure 4-3**  
**Régulation et contrôle de la masse totale**

Le pressuriseur ne peut toutefois compenser la dilatation et la contraction causée par le réchauffement et le refroidissement du circuit caloporteur primaire. Dans ce cas, le passage du caloporteur entre le réservoir d'eau lourde et le circuit permet de compenser les variations de volume. Pendant ces opérations, le pressuriseur est isolé du circuit caloporteur primaire.

En situation normale, la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire est régulée pour maintenir la pression la plus élevée au collecteur de sortie du réacteur, à sa valeur de consigne. On effectue cette régulation en modulant la pression de la vapeur et, donc, la température dans le pressuriseur.

Puisqu'un long tuyau relie le pressuriseur au collecteur de sortie, l'eau dans le pressuriseur et le tuyau est essentiellement stagnante. En conséquence, la température dans le pressuriseur peut différer de celle du collecteur de sortie. En modulant la température du pressuriseur, on peut ajuster la pression de la vapeur et, de cette façon, réguler la pression du circuit caloporteur primaire.

Habituellement, un ou deux réchauffeurs électriques (thermoplongeurs) maintiennent la température pendant une production normale (équilibrée).

En règle générale, le pressuriseur régule la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire, alors que le système d'alimentation et de

purge régule le volume. Cette régulation est effectuée en ajoutant ou en retirant du liquide du réservoir de  $D_2O$ , de façon à garder le niveau dans le pressuriseur à sa valeur de consigne.

La supériorité d'un circuit d'alimentation et de purge avec un pressuriseur sur un circuit autonome est évidente. Comme nous l'exposons plus bas, un pressuriseur présente une capacité bien supérieure d'absorption des variations transitoires de la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire.

#### **4.3.1 La régulation du niveau dans le pressuriseur**

Nous examinerons les processus dans le pressuriseur lors d'une hausse de la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire. Une pression plus élevée pousse une certaine quantité du fluide du circuit caloporteur primaire au pressuriseur, ce qui augmente le niveau de liquide. La montée du niveau d'eau lourde comprime la vapeur. Or, puisque la pression de la vapeur dépasse la pression de saturation, un peu de vapeur se condensera ce qui rétablira la pression de saturation.

La contraction de volume qui résulte de la condensation aspire de l'eau dans le pressuriseur, ce qui minimise la montée de la pression dans le circuit caloporteur primaire.

Si l'afflux d'eau est important, la montée du niveau du pressuriseur qui augmente la pression forcera l'ouverture des vannes de décharge du pressuriseur et la vapeur s'échappera de celui-ci vers le condenseur de purge. Cette action permet de rétablir rapidement la pression du circuit caloporteur primaire et le niveau d'eau. Si elle ne se produit pas, le pressuriseur est isolé afin de prévenir le passage de l'eau dans le condenseur de purge.

Si la pression du circuit caloporteur est basse, un peu de liquide passera du pressuriseur au circuit caloporteur primaire. Avec la baisse du niveau dans le pressuriseur, la vapeur prendra de l'expansion et, donc, sa pression descendra sous la pression de saturation. Une partie de l'eau du pressuriseur s'évaporerait immédiatement, ce qui comblerait le vide laissé par la perte de liquide. Ce phénomène diminue la baisse de pression.

En cas de baisse considérable de la pression, on activerait des réchauffeurs électriques supplémentaires pour élever la température de l'eau et donc la pression de la vapeur. Si la descente du niveau d'eau se poursuit, on isole le pressuriseur pour empêcher l'introduction de vapeur dans le circuit caloporteur primaire.

On doit souligner que ces changements de phase — de liquide à vapeur et inversement — font du pressuriseur un dispositif très efficace de régulation de la pression du circuit caloporteur primaire.

#### **4.3.2 Récapitulation des notions fondamentales sur la régulation de la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire**

Pour assurer la sûreté du fonctionnement du réacteur, on doit maintenir la pression dans des limites spécifiques. On utilise un circuit d'alimentation et de purge pour réguler les pressions de systèmes incompressibles.

Si l'on prévoit que le caloporteur s'évaporerait un peu dans les canaux, on ajoutera un pressuriseur au circuit d'alimentation et de soutirage. Le pressuriseur régule de façon efficace la pression d'alimentation du circuit caloporteur primaire pendant un fonctionnement normal et les phénomènes transitoires. Lors du réchauffement ou du refroidissement du système caloporteur principal, on isole le pressuriseur et l'on utilise le circuit d'alimentation et de purge pour réguler la pression.

Si la pression du circuit caloporteur primaire est très élevée, des vannes de décharge s'ouvriront ce qui amènera du liquide caloporteur au condenseur de purge. À cause de la chute de pression, le caloporteur s'évaporerait instantanément. Dans le pressuriseur, cette vapeur sera ensuite condensée par les tubes dans lesquels circule le reflux de liquide ou encore par la pulvérisation du reflux de liquide.

Les gaz non condensables accumulés dans le condenseur forment un écran autour des tubes de refroidissement, ce qui réduit l'efficacité du transfert de chaleur. En conséquence, la température et la pression de la vapeur augmentent.

Un tuyau assez long relie le pressuriseur au collecteur de sortie du réacteur. Cette configuration permet au pressuriseur d'absorber les variations transitoires de pression. Le pressuriseur est un récipient contenant un liquide et sa vapeur, tous deux saturés. C'est un outil très efficace de régulation de la pression d'alimentation du système caloporteur.

#### **4.4 INTRODUCTION AUX GÉNÉRATEURS DE VAPEUR**

Dans les chapitres précédents, nous avons expliqué en détail les processus thermodynamiques qui s'appliquent lors du fonctionnement normal et anormal du réacteur et du circuit caloporteur.

Pour fonctionner de façon sécuritaire, nos réacteurs doivent être dotés d'un puits de chaleur et ce, quelle que soit la puissance, même pour une puissance neutronique nulle. En conditions normales, les générateurs de

vapeur servent de puits de chaleur. Dans cette sous-section, nous traiterons du fonctionnement des générateurs de vapeur et de leurs processus thermodynamiques.

Si deux systèmes thermodynamiques de température différente sont en contact thermique, de la chaleur s'écoulera du système le plus chaud au plus froid. Dans le cas qui nous intéresse, la chaleur est retirée du caloporteur et transférée à l'eau dans le générateur de vapeur. Ainsi, l'enthalpie du caloporteur diminue, alors celle de l'eau du générateur augmente.

Dans le générateur de vapeur — parfois appelé la chaudière — le transfert de chaleur se produit entre les faisceaux de tubulures (les tuyaux en « U ») et l'eau dans le volume en ébullition du générateur. Si les tuyaux en U ne sont pas totalement immergés, la surface de transfert de chaleur est réduite, entraînant la baisse du coefficient de transfert, et donc, de la capacité du puits de chaleur. Ainsi, la régulation efficace du niveau de liquide dans le générateur est une composante cruciale du fonctionnement d'un réacteur.

#### **4.4.1 Niveau de liquide du générateur**

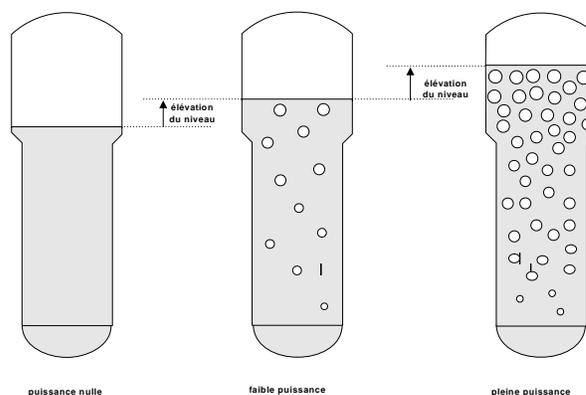
Lorsque l'ébullition commence dans un générateur, les bulles de vapeur sont formées à la surface des tubes et elles montent à la surface de l'eau dans le générateur. Ces bulles de vapeur occupent plus d'espace que l'eau. Par exemple, à une pression de 4 MPa(a), le volume spécifique de vapeur est 40 fois supérieur à celui de l'eau. Donc, s'il y a ébullition, le niveau du liquide augmente dans le générateur. On appelle ce phénomène *gonflement* du niveau. Si l'ébullition diminue, le niveau du liquide descendra dans le générateur, c'est la contraction du niveau.

#### **4.4.2 Gonflement et contraction stationnaires**

Dans des conditions stables de fonctionnement, le générateur de vapeur est en équilibre thermique. Le taux d'évacuation de la chaleur par la vapeur est égal au taux d'entrée de chaleur apportée par le fluide caloporteur.

Si la puissance du réacteur est nulle, l'ébullition est négligeable et, pour simplifier, nous supposons qu'aucune bulle de vapeur n'est formée. L'analyse qui suit présume que la masse de l'eau est constante, et que cette quantité est conservée sur toute la gamme de puissance. Avec la montée en puissance, des bulles apparaissent, comme le montre la figure 4-4.

Notes



**Figure 4-4**  
**Gonflement stationnaire de l'eau dans le générateur**

Ces bulles déplacent l'eau et causent une élévation de son niveau. À mesure que la puissance s'accroît, le niveau monte et atteint un maximum lorsque sont atteintes les conditions de pleine puissance.

À toute puissance stable, correspond un niveau précis. On appelle *gonflement stationnaire* cette augmentation du niveau. Évidemment, c'est à la pleine puissance que le gonflement sera le plus important.

Lorsque nous diminuons la puissance, l'analogie inverse s'applique et le niveau d'eau descend. À toute fraction de puissance totale, correspond un niveau d'eau stable. On appelle *contraction stationnaire* cette diminution du niveau.

Le lecteur remarquera que les gonflements et les contractions stationnaires correspondent à la production stable et équilibrée de puissance. En pratique, ceci s'applique aussi aux opérations lentes de chargement et de déchargement. Dans ces conditions, les effets transitoires présentés dans la sous-section suivante seront négligeables.

#### **4.4.3 Contraction et gonflement transitoires**

Pendant le chargement ou le déchargement du réacteur et lors de certaines excursions — comme un arrêt d'urgence — le niveau du générateur subira des changements transitoires : les gonflements et contractions transitoires.

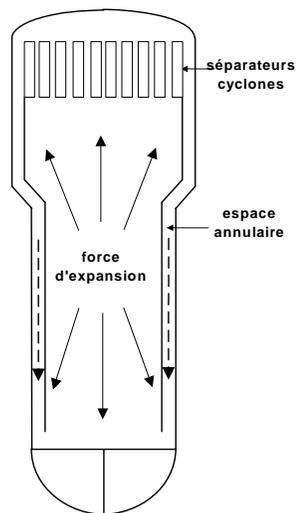
Les *gonflements transitoires* sont des augmentations passagères du volume au-dessus du niveau stationnaire correspondant à une puissance thermique donnée du réacteur.

Les *contractions transitoires* sont des baisses temporaires du volume sous le niveau stationnaire correspondant à une puissance donnée du réacteur.

Ces deux phénomènes sont associés à des changements rapides du volume total occupé par des bulles de vapeur dans l'eau du générateur de vapeur. Une hausse rapide de ce volume produira un gonflement transitoire, et une réduction rapide, une contraction transitoire.

Les causes principales de gonflements et de contractions transitoires sont les changements rapides et importants de la puissance du réacteur ou de la pression dans le générateur de vapeur, ou des deux. Quelle qu'en soit la cause, le volume total occupé par les bulles de vapeur dans le générateur change rapidement. Par exemple, modifier la puissance du réacteur causera un gonflement dans le générateur, à cause de l'élévation rapide de la chaleur transmise au générateur de vapeur.

Il s'agit d'un phénomène assez simple. Toutefois, les effets liés à une baisse de pression dans le générateur sont plus complexes. Une chute de la pression du générateur résultera en l'évaporation spontanée d'une partie de l'eau. La vapeur produite s'ajoute à celle déjà générée par la chaleur transférée par le fluide caloporteur. Une chute de pression dans le générateur produira aussi un accroissement du volume occupé par la vapeur, puisque la vapeur est expansible. Autrement dit, le volume spécifique de la vapeur augmente quand la pression du générateur descend.



**Figure 4-5**  
**Dynamique d'un gonflement transitoire**

La combinaison de ces deux effets provoque l'expansion rapide et dans toutes les directions de l'eau du générateur. Comme le montre la figure 4-5, cette expansion rapide a deux effets dynamiques qui provoquent la montée du niveau dans l'espace annulaire (admission d'eau). Puisque les limnimètres du générateur de vapeur sont attachés à l'espace annulaire plutôt qu'à sa partie centrale, les effets que nous venons

de mentionner occasionneront une lecture erronée du niveau et donc à une régulation erronée de la hauteur du liquide.

Premier effet dynamique. L'écoulement au travers des séparateurs cyclones augmente alors que le mélange eau-vapeur dans les faisceaux de tubulures est forcé par le haut. Ceci accroît l'écoulement vers le bas dans l'espace annulaire.

Second effet dynamique. Le débit d'eau qui s'écoule de l'espace annulaire est réduit. Les forces d'expansion au fond du générateur où se trouvent les faisceaux de tubulures s'opposent à cet écoulement.

En outre, avec la baisse de la pression, une certaine quantité d'eau dans l'espace annulaire s'évaporerait instantanément, ce qui contribuerait aussi à l'augmentation du niveau. Le lecteur notera que le gonflement transitoire s'évanouira une fois que les conditions d'équilibre seront rétablies dans le générateur.

Les causes principales de la contraction transitoire sont :

- Une chute importante et rapide de la puissance du réacteur (p. ex. : un arrêt d'urgence ou un recul de la puissance du réacteur).
- Une augmentation de la pression dans le générateur (p. ex. : l'arrêt d'urgence de la turbine)

La baisse rapide du volume total des bulles de vapeur dans l'eau du générateur est causée par la baisse du transfert de chaleur transportée par le fluide caloporteur ou la condensation de bulles à la suite de la hausse de la pression dans le générateur. Une augmentation de la pression dans la chaudière compressera également le reste des bulles de vapeur.

L'effondrement du volume total occupé par les bulles de vapeur produit deux effets dynamiques : Le premier est la baisse de l'écoulement vers le bas dans l'espace annulaire, puisque beaucoup moins d'eau et de vapeur pénètrent dans les séparateurs cyclones. Le second effet aspire l'eau du bas de l'espace annulaire vers le faisceau de tubulures. En conséquence, le niveau d'eau dans l'espace annulaire chute.

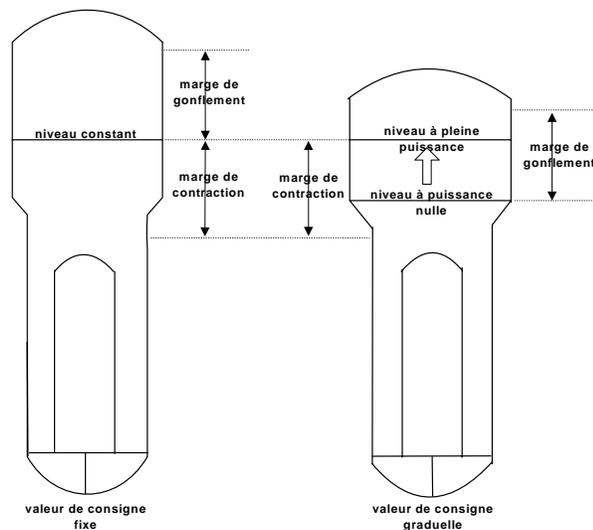
Dès que le volume des bulles se stabilise, les deux effets dynamiques disparaissent et les conditions d'équilibre sont rétablies.

#### **4.4.4 Régulation du niveau d'eau dans le générateur**

Cette sous-section explique pourquoi la valeur de consigne du niveau d'eau dans le générateur suit la montée de puissance du réacteur. On parle de point de consigne graduel.

La raison principale de cette augmentation progressive est de pouvoir absorber les gonflements et les contractions transitoires avec le plus petit générateur possible. Deux générateurs sont comparés à la figure 4-6 : le premier a une valeur de consigne fixe, le second une valeur de consigne graduelle.

À pleine puissance, les deux générateurs contiennent la même quantité d'eau (et donc peuvent donc offrir la même capacité post-accidentelle de puits de chaleur, en cas de perte d'eau d'alimentation). Les deux générateurs peuvent évidemment absorber les mêmes gonflements et contractions. Toutefois, la cuve d'acier du générateur dont la valeur de consigne est graduelle est beaucoup plus petite.



**Figure 4-6**  
**Régulation avec une valeur de consigne fixe et**  
**une valeur de consigne graduelle**

La figure 4-6 montre qu'à puissance nulle, la valeur de consigne du niveau est minimale et qu'elle est maximale à pleine puissance. Ceci traduit le fait que le volume de gonflement et de contraction transitoire dépend de la puissance thermique du réacteur.

Les gonflements transitoires les plus importants auront lieu pendant les manœuvres de puissance accompagnant le chargement rapide, à partir d'une puissance nulle. Dans ces conditions, le niveau dans le générateur est à un minimum et, donc, le gonflement est facilement absorbé. Le lecteur devrait remarquer qu'aucun générateur ne peut absorber le gonflement transitoire causé par certaines conditions accidentelles, notamment le bris d'une conduite primaire de vapeur.

De la même manière, la contraction transitoire maximale résultera d'un arrêt d'urgence du réacteur à pleine puissance. Le niveau d'eau dans le générateur est donc le plus élevé à ce point. Pour conclure, l'adoption d'une valeur de consigne variant graduellement avec la puissance, permet d'utiliser un contenant plus petit tout en conservant des marges adéquates pour les gonflements et les contractions transitoires.

#### **4.4.5 Niveau incorrect d'eau dans le générateur**

Nous examinons maintenant les conséquences négatives et les préoccupations pour le fonctionnement du réacteur d'un niveau d'eau trop élevé ou trop bas de l'eau dans le générateur de vapeur.

##### **Niveau trop bas dans le générateur**

Lorsque le niveau d'eau dans le générateur est trop bas, la capacité d'absorption de la chaleur produite par le réacteur diminue, ce qui peut avoir des conséquences graves :

Si les tubes du générateur de vapeur ne sont pas complètement couverts, la diminution de la surface de contact réduira le transfert de la chaleur transportée par le fluide caloporteur. Si l'on suppose que la puissance du réacteur reste constante, la température moyenne du caloporteur augmentera. Si l'on ne prend pas les actions préventives adéquates, l'ébullition excessive du caloporteur entraînera la surchauffe du combustible et, par la suite, le bris du combustible et la rupture de la gaine.

Dans le pire des scénarios — la perte d'eau d'alimentation du générateur — la masse d'eau sera rapidement épuisée. En conséquence, l'opérateur aura très peu de temps pour assurer le refroidissement du réacteur pendant une longue période s'il ne prend pas des mesures de protection.

Puisqu'un niveau peu élevé de liquide dans le générateur compromet la sûreté du réacteur, il réduira la puissance du réacteur directement ou en palier (selon la situation) et il l'arrêtera à un seuil préétabli. Ces actions préventives résulteront en une perte de production.

##### **Niveau élevé dans le générateur**

Un niveau trop élevé peut avoir les conséquences négatives suivantes :

Un niveau d'eau trop élevé pourrait submerger les séparateurs cyclones, ce qui augmentera la quantité d'humidité transportée et, potentiellement, des impuretés dans la vapeur allant à la turbine.

Un fonctionnement prolongé dans ces conditions pourrait avoir des effets nuisibles graves sur la turbine et les systèmes connexes.

Si le niveau continue à monter, des paquets d'eau pourraient finalement entrer dans le circuit de vapeur et passer ensuite dans la turbine. Dans ces conditions, la turbine pourrait subir des dommages graves, voire catastrophiques. Dans la meilleure éventualité, la turbine fera l'objet d'un programme d'inspection complet.

Pour prévenir l'introduction d'eau dans la turbine, un haut niveau d'eau dans le générateur provoquera un arrêt d'urgence. Cette mesure de prévention est obligatoire, mais se traduit par une perte de production.

#### **4.4.6 Récapitulation des notions fondamentales de la sous-section sur le niveau d'eau dans le générateur de vapeur**

Lorsque la puissance thermique du réacteur est nulle, le titre en vapeur dans le générateur est négligeable. Lorsque l'on augmente la production de puissance, des bulles de vapeur apparaîtront à un certain point et leur concentration s'accroîtra progressivement avec la puissance.

Le volume spécifique de la vapeur est beaucoup plus élevé que celui de l'eau. Donc, la formation de bulles déplacera l'eau du générateur et causera l'élévation du niveau d'eau. Pour une puissance constante donnée, ce niveau sera stable et supérieur au niveau correspondant à la puissance nulle. On appelle gonflement stationnaire cette élévation du niveau.

Le phénomène contraire se produit quand la puissance est réduite graduellement. Pour une puissance constante donnée, le niveau est stable et inférieur au niveau correspondant à la pleine puissance. On appelle contraction stationnaire, cette baisse de niveau.

Les gonflements et contractions transitoires s'ajoutent au gonflement ou contraction stationnaire et apparaissent lors de changements rapides de la puissance.

Les gonflements transitoires apparaissent lorsque la puissance du réacteur monte rapidement ou lors d'une chute accélérée de la pression dans le générateur de vapeur. Deux effets dynamiques se manifestent lors de la montée rapide du volume occupé par les bulles de vapeur dans l'eau du générateur.

Premièrement, un peu d'eau est poussée dans les séparateurs cyclones ce qui accroît leur charge et, par la suite, l'écoulement dans l'espace annulaire. Deuxièmement, le débit d'eau qui sort de l'espace annulaire est limité. À cause de ce décalage, le niveau d'eau augmente dans l'espace annulaire. Donc, le niveau dans le générateur indique une hausse du

niveau. Si le gonflement est causé par une chute de la pression dans le générateur, il y aura davantage d'ébullition instantanée. Ces facteurs pourront contribuer à une indication erronée du niveau et donc affecter la régulation.

Les contractions transitoires apparaissent pendant le chargement et les excursions du réacteur, comme les arrêts d'urgence. Une autre cause importante est l'augmentation rapide de la pression dans le générateur, notamment lors du débranchement d'une turbine ou certaines excursions comme l'arrêt d'urgence d'une turbine.

Deux effets dynamiques se produisent lorsque le volume occupé par les bulles dans le générateur diminue rapidement. Premièrement, le débit d'eau dans les séparateurs cyclones diminue, causant la réduction correspondante du débit dans l'espace annulaire. Deuxièmement, l'eau au fond de l'espace annulaire sera aspirée dans la région des faisceaux de tubulures et le niveau d'eau dans l'espace annulaire diminuera. En conséquence, l'indication du niveau d'eau sera erronée ce qui affecte la régulation.

On augmente la valeur de consigne du niveau du générateur à mesure que l'on augmente le niveau de puissance thermique du réacteur. Grâce à cette procédure, un générateur de petite taille pourra absorber les gonflements et les contractions transitoires. Cette économie exploite le fait que les gonflements transitoires maximaux potentiels coïncident avec la puissance nulle, alors que les contractions transitoires maximales potentielles se produisent à la pleine puissance.

Les niveaux hauts ou bas ont des conséquences nuisibles et provoquent des soucis lors de l'exploitation :

Bas niveau : la tuyauterie d'échange de chaleur n'est pas entièrement submergée, ce qui provoque une perte à long terme de refroidissement du combustible du réacteur.

Haut niveau : les séparateurs cyclones sont inondés et des paquets d'eau peuvent pénétrer dans le circuit de vapeur et, donc, entre dans la turbine.

#### **4.4.7 La pression dans la chaudière**

Pour bien comprendre la relation entre la pression dans le générateur et les paramètres du système, il est nécessaire de réexaminer le fonctionnement du générateur.

L'eau lourde chaude sous pression pénètre dans le bas du générateur et circule dans les faisceaux de tubulures. Ces faisceaux de tubulures sont plongés dans l'eau légère qui est poussée dans l'enceinte du générateur par

les pompes d'alimentation. L'eau lourde est plus chaude que l'eau légère, la chaleur passe donc de celle-là à celle-ci.

La température de l'eau légère qui alimente le générateur doit être assez proche de celle de l'eau qui s'y trouve déjà, afin d'éviter les dommages qu'occasionnerait un choc thermique trop violent. Quand l'eau quitte le dernier réchauffeur d'alimentation, elle est encore trop froide par rapport à l'eau du générateur. Elle doit donc, avant d'y être versée, circuler dans les préchauffeurs où elle sera portée à la température de saturation dans le générateur. Les préchauffeurs peuvent être à l'intérieur ou à l'extérieur du générateur.

Après avoir atteint la température de saturation dans le préchauffeur, l'eau s'écoule dans le générateur et recouvre les faisceaux de tubulures. La chaleur est transférée du caloporteur à l'intérieur des tubulures à l'eau légère à l'extérieur, ce qui provoque son ébullition.

La vapeur produite (sa fraction humide est d'environ 90 %) s'élève de la surface de l'eau et passe dans les séparateurs cyclones. À la sortie des séparateurs, la fraction sèche de la vapeur est d'environ 99,8 %.

La grande quantité d'eau séparée de la vapeur s'écoule à l'extérieur de l'enceinte du générateur puis dans l'espace annulaire. Elle descend ensuite et passe sous la jupe qui sépare la région des faisceaux de tubulures de l'espace annulaire. Au contact avec les faisceaux de tubulures, plus de vapeur est produite. La quantité d'eau qui s'écoule dans la région des faisceaux de tubulures, à partir de l'espace annulaire est, en général, dix fois plus grande que la quantité d'eau qui entre dans le générateur.

Cette recirculation est activée par la gravité. L'eau plus dense descend dans l'espace annulaire et force vers le haut l'eau moins dense à proximité des faisceaux de tubulures.

### **Taux de recirculation**

On appelle *taux de recirculation*, le nombre de cycles nécessaire pour que 1 kg d'eau légère soit complètement transformé en vapeur. Ce nombre est généralement proche de dix.

Au chapitre 1, nous avons noté que plus la pression était élevée, moins il est nécessaire de chauffer un liquide pour le transformer en vapeur. On peut appliquer l'équation qui décrit ce mode de transfert de chaleur aux générateurs des réacteurs CANDU :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot l_v,$$

où  $\dot{Q}$  est le taux de transfert de chaleur du réacteur à l'eau du générateur,  $\dot{m}$  le débit massique de l'eau dans le générateur et  $l_v$  la chaleur latente d'évaporation.

Pour une pression constante dans le générateur, la chaleur latente d'évaporation restera constante et le débit d'eau d'alimentation au générateur sera égal au débit vapeur du générateur et proportionnel au taux de transfert de chaleur. Le taux de recirculation n'est pas affecté par le débit de la vapeur.

Lors du lancement du réacteur, la pression dans le générateur augmente. L'alimentation en eau du générateur surpasse son débit de vapeur. Quand la pression est basse, le taux de recirculation est plus élevé que dix. Quand la pression se rapproche de sa valeur normale, le débit d'eau d'alimentation et le débit de vapeur tendent à s'égaliser et le taux de recirculation s'approche de sa valeur normale.

Avant le début du refroidissement du réacteur, la pression et le taux de recirculation auront leur valeur normale.

S'il y a une diminution de la pression causée par une augmentation du débit sortant de vapeur relativement au débit d'alimentation, le taux de recirculation sera plus élevé.

#### 4.4.8 Pression de la chaudière et transfert de chaleur

L'ébullition a lieu lorsque la température de l'eau atteint  $T_{\text{sat}}$  pour un  $p_{\text{sat}}$  donné. Donc, la pression et la température dans le générateur sont strictement corrélées.

Dans toutes nos centrales, le caloporteur dans le collecteur de sortie du réacteur devrait être sous-refroidi, quelle que soit la puissance, même dans le cas où le caloporteur bout dans certains canaux de combustible. Puisque le caloporteur ne change pas de phase, on peut utiliser l'équation suivante :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T ,$$

où  $\dot{Q}$  est le taux de transfert de chaleur du caloporteur,  $\dot{m}$  est le débit du caloporteur,  $c$  est la capacité thermique spécifique de l'eau lourde et  $\Delta T$  est la différence de température du caloporteur entre les collecteurs.

Comme nous le décrivions plus tôt, l'eau du circuit secondaire est chauffée dans le réchauffeur d'alimentation et les préchauffeurs (afin de protéger le générateur des chocs thermiques et augmenter l'efficacité du cycle). Ainsi, l'eau dans le circuit secondaire passera de la phase liquide à

la phase vapeur dans la région d'ébullition. L'équation d'équilibre du transfert de chaleur s'écrira donc :

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot c \cdot \Delta T = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta h_{\text{H}_2\text{O}}.$$

À l'équilibre, la quantité de chaleur entrant dans le générateur avec l'eau est égale à la quantité de chaleur sortant sous la forme de vapeur,  $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$  est égal au débit massique de vapeur.

La chaleur libérée par le caloporteur dans le générateur est égale à la chaleur reçue par l'eau du générateur. Quelle quantité de chaleur sera-t-elle échangée entre ces deux systèmes ? Cette question mérite une attention particulière :

Le taux de transfert de chaleur est décrit par l'équation :

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m,$$

où  $\dot{Q}$  est le taux de transfert de chaleur, une quantité liée à la puissance thermique du réacteur,  $U$  est le coefficient global de transfert de chaleur,  $A$  est l'aire efficace de la tubulure du générateur et  $\Delta T_m$  est la différence moyenne de température entre l'eau lourde et l'eau légère dans le générateur.

Si les faisceaux de tubulures du générateur sont recouverts d'eau et si les tubulures ne sont ni encrassées ni bouchées, on pourra négliger les petites variations de  $U$  qui résultent de changement dans la quantité de bulles de vapeur dans le générateur. Dans cette situation, nous supposons qu'il n'y a pas de changements aux paramètres  $U$  et  $A$  et, donc, le seul paramètre que l'on peut modifier est  $\Delta T_m$ .

Si la température dans le générateur s'élève pour une même température du caloporteur,  $\Delta T_m$  diminuera et la quantité de chaleur transférée diminuera.

Si la température de l'eau dans le générateur descend pour une même température du caloporteur, la quantité de chaleur transférée augmentera.

Une variation de la pression dans le générateur changera  $T_{\text{sat}}$  dans le générateur. Donc, en modifiant la température dans le générateur, on régulera la quantité de chaleur transférée. La régulation du débit massique de vapeur contrôle la pression dans le générateur. Donc, le taux de transfert de chaleur au générateur est proportionnel au débit massique de la vapeur.

Si on diminue la quantité de chaleur extraite du générateur, la pression de la vapeur augmente. Si la pression dans le générateur augmente,  $T_{\text{sat}}$  augmentera et moins de chaleur sera transférée au générateur. Ceci provoquera l'augmentation de la température du caloporteur dans le circuit caloporteur primaire. Nous aborderons cette situation en détail quand nous discuterons du réchauffement du circuit caloporteur primaire.

Si plus de chaleur est transférée du générateur, la pression dans le générateur diminuera,  $T_{\text{sat}}$  descendra, plus de chaleur passera du caloporteur au circuit secondaire et sa température s'abaissera.

#### **4.4.9 Pression dans le générateur pendant le réchauffement et le refroidissement du circuit caloporteur primaire**

Dans cette sous-section, le lecteur apprendra comment et pourquoi les changements de la pression du générateur affectent la température moyenne du caloporteur pendant le réchauffement et le refroidissement du circuit caloporteur primaire. Cette régulation est réalisée par le programme de régulation de la pression du générateur (RPG).

Pendant le réchauffement et le refroidissement du circuit caloporteur primaire, le programme RPG régule la pression du générateur en modifiant, selon la centrale, la fréquence à laquelle la vapeur est purgée dans l'atmosphère ou dirigée vers les condenseurs de turbine. À la centrale de Pickering, la vapeur est déchargée dans l'atmosphère en utilisant des vannes de décharge de la vapeur dans l'atmosphère (ASDV). Cette méthode augmente la consommation d'eau d'appoint.

Aux centrales de Bruce et de Darlington, la vapeur peut être dirigée vers les condenseurs ou l'atmosphère. Ceci est réalisé par les vannes de décharge au condenseur ou les vannes de décharge dans l'atmosphère. Normalement, on utilise les vannes de décharge aux condenseurs pour conserver l'eau d'appoint. Il n'est toutefois pas toujours possible d'utiliser ces dernières et leur ouverture peut être interdite dans certaines conditions, si le vide dans les condenseurs n'est pas assez poussé, par exemple.

Variation du taux de décharge de la vapeur change le taux de rejet de chaleur par les générateurs. Si le débit de chaleur injecté aux générateurs coïncide avec ce débit de chaleur, il y aura équilibre et la pression et la température seront constantes dans le générateur.

Pendant le réchauffement, le rejet de chaleur dans l'atmosphère est inférieur à celui apporté par le réacteur et les pompes du système caloporteur primaire. Donc, la température de l'eau, de la vapeur et du métal dont est constitué le générateur s'accroîtra. À mesure que la température de l'eau et de la vapeur dans le générateur s'élève, la différence de température moyenne dans les tubes de générateur

descendra. Donc, l'extraction de chaleur par les générateurs diminuera. Dans cette situation, le circuit caloporteur primaire recevra plus de chaleur (des pompes et du réacteur) qu'il en rejettera aux générateurs. Ainsi, la température du caloporteur s'élèvera.

Si nous supposons que la puissance du réacteur est constante, la différence de température moyenne de l'intérieur à l'extérieur des tubes du générateur retournera à sa valeur originale avant que la pression augmente dans le générateur, donc :

→ → → →

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m.$$

Au nouvel équilibre, l'augmentation de  $T_{m \text{ D}_2\text{O}}$  compensera l'augmentation de  $T_{m \text{ H}_2\text{O}}$ , ce que l'on peut constater en développant  $\Delta T_m$  :

→ ↑ ↑

$$\Delta T_m \cong T_{m \text{ D}_2\text{O}} - T_{m \text{ H}_2\text{O}}.$$

Plus la pression dans le générateur augmente rapidement, plus rapide sera le réchauffement du circuit caloporteur primaire et des générateurs de vapeur. Pour augmenter la vitesse du réchauffement, il s'agit simplement de diminuer le débit de décharge de la vapeur. En contrepartie, on peut réduire la vitesse de réchauffement en augmentant le débit de décharge de la vapeur. Il faut beaucoup de chaleur pour compenser les pertes thermiques et hausser la température des centaines de tonne de métal et d'eau du circuit caloporteur primaire et des générateurs. Donc, pour obtenir le taux désiré de chauffage, la contribution de la chaleur au circuit caloporteur primaire doit augmenter avec la température.

En pratique, les pompes du circuit caloporteur primaire peuvent fournir cette chaleur pendant les premiers stages du réchauffement, alors que l'équipement est plutôt froid et donc que les pertes de chaleur (au travers de l'isolation thermique et à cause du dégazage du générateur) sont limitées. À la fin du réchauffement, le réacteur devra toutefois fournir une partie de la chaleur nécessaire.

Lors du refroidissement, le décalage thermique sera évidemment dans la direction opposée. Il faut rejeter plus de chaleur que celle fournie par le réacteur et les pompes du circuit caloporteur primaire. Les changements à la pression du générateur, aux températures  $T_{m \text{ H}_2\text{O}}$  et  $T_{m \text{ D}_2\text{O}}$  et à  $\Delta T_m$  vont dans la direction opposée de celles accompagnant le réchauffement. Pour accélérer le refroidissement, le programme RGP accroît la décharge de

vapeur. En contrepartie, pour le ralentir, il suffit de réduire le débit de décharge de la vapeur.

Dans la plupart des cas, le réacteur est arrêté pendant le refroidissement. La désintégration radioactive et les pompes du circuit caloporteur primaire fournissent environ 5 % de la pleine puissance thermique du réacteur. En conséquence,  $\Delta T_m$  est très petit et, donc,  $T_{m \text{ D}_2\text{O}} \cong T_{m \text{ H}_2\text{O}}$ . Pour les mêmes raisons, le réacteur élèvera peu la température du caloporteur et, donc,  $T_{\text{entrée}} \cong T_{\text{sortie}} \cong T_{m \text{ D}_2\text{O}}$ . ( $T_{\text{entrée}}$  et  $T_{\text{sortie}}$  sont respectivement les températures aux collecteurs d'entrée et de sortie).

Il est intéressant de noter, en passant, que les mêmes processus thermodynamiques s'appliquent aux refroidissements intempestifs (*crash cooldown*) et aux bris des conduites de vapeur principales. La différence la plus importante est la vitesse du refroidissement. Le refroidissement n'est pas maîtrisé et il sera évidemment beaucoup plus rapide que lors d'un refroidissement normal.

Nous discutons maintenant d'un refroidissement typique du circuit caloporteur principal effectué lors de l'arrêt d'un réacteur.

Habituellement, on arrête le réacteur avant que le refroidissement soit amorcé. On surveille la progression du refroidissement en mesurant la température au collecteur de sortie du réacteur.

Le refroidissement doit être suffisamment lent pour prévenir les chocs thermiques excessifs (la vitesse recommandée est d'environ 2,8 °C/min ou 5 °F/min), mais suffisamment rapide pour minimiser :

- le risque de fissuration par hydratation retardée des tubes de force,
- les pertes d'eau déminéralisée,
- la durée de l'arrêt du réacteur.

Dans ce qui suit, le lecteur apprendra pourquoi le programme RPG ne peut maintenir une vitesse de refroidissement constante du circuit caloporteur primaire jusqu'à 100 °C. Le refroidissement régulé par les générateurs s'arrête lorsque la température atteint un point entre 150 et 165 °C, selon les centrales. À ce moment, le système de refroidissement à l'arrêt prend le relais. Les processus utilisés diffèrent d'une centrale à l'autre.

Avant de discuter de différences entre les centrales, concentrons-nous sur les aspects communs du refroidissement. Pour avoir un taux de refroidissement constant, le débit massique de vapeur doit lui-même être plus ou moins constant. Or, une baisse de pression dans le générateur entraîne une chute de la densité de la vapeur. Le débit volumétrique de la vapeur doit s'accroître pour conserver la vitesse de refroidissement désirée.

Ainsi, les vannes qui contrôlent le débit de vapeur doivent être ouvertes progressivement. Une fois qu'elles sont complètement ouvertes, la vitesse de refroidissement ne peut plus être maintenue. À partir de ce point, le débit massique de vapeur diminuera et, donc, la vitesse de refroidissement.

À la centrale de Pickering, le rejet de vapeur est contrôlé par les vannes de décharge à l'atmosphère. Elles sont complètement ouvertes quand la température de la vapeur dans le générateur est d'environ 130 °C. Pour conserver l'eau d'appoint, le système de refroidissement à l'arrêt prend le relais à une température d'environ 150 °C. Pour minimiser les chocs thermiques, le système de refroidissement à l'arrêt est préchauffé avec le caloporteur du réacteur.

Aux centrales de Bruce et Darlington, le rejet de vapeur est d'abord régulé par les vannes de décharge aux condenseurs. Ces vannes permettent de contrôler la vapeur du générateur à des températures supérieures à 180-185 °C, ce qui correspond à une pression de 1,1-1,2 MPa(a).

À cette pression, la densité de la vapeur est si basse que les vannes d'admission à la boîte étanche de la turbine et aux éjecteurs de jet de vapeur à l'air dans le système d'extraction d'air du condenseur sont complètement ouvertes.

À mesure que la pression tombe dans le générateur, le débit massique de vapeur diminue et ne peut donc plus alimenter adéquatement les éjecteurs et les turbines, leur rendement diminue donc.

Dans ces conditions, la pression dans le condenseur augmentera et l'ouverture maximale possible de la vanne de décharge au condenseur sera limitée afin de prévenir une augmentation supplémentaire de la pression. On appelle cette action le déchargement par dépression. Si la pression continue de monter dans le condenseur, elle atteindra une valeur préréglée qui forcera la fermeture automatique des vannes de décharge au condenseur.

De toute façon, l'ampleur du déchargement par dépression augmente avec l'élévation de la pression dans le condenseur. Éventuellement, les vannes de décharge au condenseur ne pourront plus maintenir la vitesse désirée de refroidissement.

Les vannes de décharge de la vapeur dans l'atmosphère peuvent contribuer au refroidissement, mais elles sont assez petites et ne peuvent maintenir le taux de refroidissement. Ainsi, la vitesse de refroidissement diminue progressivement jusqu'à ce que le système de refroidissement à l'arrêt prenne le relais, à une température de 150 °C à Darlington et de 165 °C à Bruce.

Si l'on mettait en service le système de refroidissement à l'arrêt plus tôt, on soumettrait le système à un choc thermique excessif, alors que si on le mettait en service plus tard, on augmenterait les risques de fissuration par hydratation retardée, la consommation d'eau déminéralisée et le temps d'arrêt du réacteur.

#### 4.4.10 Récapitulation des notions fondamentales de la sous-section

Le transfert de chaleur entre le caloporteur et le générateur est conforme à l'équation :

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

Puisque dans les conditions normales,  $U$  et  $A$  sont fixes, toute variation de la puissance du réacteur causera un changement proportionnel à  $\Delta T_m$ .

$\Delta T_m$  est l'écart entre la température moyenne du caloporteur dans le circuit caloporteur primaire et celle dans le générateur. Donc, la température du générateur est liée à la pression dans le générateur. Une élévation de cette pression causera une élévation de la température de l'eau du générateur. Si l'on suppose que le taux de transfert de chaleur est constant, ceci causera une augmentation correspondante de la température moyenne du caloporteur dans le réacteur.

Pendant le réchauffement et le refroidissement du circuit caloporteur primaire, en utilisant le générateur,  $T_{m \text{ D}_2\text{O}}$  varie de concert avec  $T_{m \text{ H}_2\text{O}}$ .

On règle la vitesse de réchauffement ou de refroidissement en changeant le taux de décharge de la vapeur du générateur dans les condenseurs principaux ou l'atmosphère, selon la centrale.

On a fixé la vitesse de refroidissement pour empêcher les chocs thermiques excessifs, tout en minimisant les risques de fissuration par hydratation retardée, la perte d'eau d'appoint et le temps d'arrêt du réacteur. À une température entre 150 et 165 °C, selon la centrale, le contrôle du refroidissement est transféré des générateurs au système de refroidissement à l'arrêt, lequel a été préchauffé pour éviter les chocs thermiques.

#### 4.5 QUESTIONS DE RECAPITULATION — ÉLÉMENTS DU CIRCUIT CALOPORTEUR PRIMAIRE

1. Tout le liquide qui circule dans le circuit caloporteur primaire passe dans le condenseur de purge.
  - a. Expliquez l'utilité du condenseur de purge.
  - b. Expliquez pourquoi la présence de gaz non condensables dans le condenseur de purge peut réduire son efficacité.
  - c. Le condenseur de purge est doté de deux vannes pour le refroidissement : une vanne pour la canalisation du liquide de reflux et une autre pour le pulvérisateur. Expliquez pourquoi deux vannes sont nécessaires et dans quelles circonstances servent-elles pour refroidir le condenseur de purge.
2. Un pressuriseur régule la pression d'un circuit caloporteur, expliquez comment le pressuriseur maintiendra la pression dans le circuit, en cas de chute soudaine de la pression de caloportage.
3. Lors d'un changement de puissance d'une centrale, les générateurs subissent des gonflements et des contractions transitoires et stationnaires. Expliquez ces deux phénomènes.
4. Expliquez comment on utilise la pression dans le générateur comme le paramètre principal pour apparier la puissance électrique de l'alternateur à la production thermique du réacteur.
5. La diminution de la pression dans le générateur affecte la température du collecteur d'entrée du réacteur. Précisez si la température s'élèvera ou descendra et expliquez pourquoi.
6. Pour réchauffer le circuit caloporteur primaire, on règle la puissance du réacteur à 4 % de la pleine puissance et on élève la température dans le générateur à une cadence de 2,8 °C par minute. Expliquez de quelle façon cette procédure réchauffe le circuit caloporteur primaire et fait monter la pression du générateur jusqu'à la pression de fonctionnement.