

## **Mécanique des fluides**



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>OBJECTIFS .....</b>	<b>1</b>
1.1	DÉFINITIONS DE BASE .....	1
1.2	PRESSION .....	1
1.3	ÉCOULEMENT.....	1
1.4	ÉNERGIE DANS UN FLUIDE EN ÉCOULEMENT .....	1
1.5	AUTRES PHÉNOMÈNES.....	2
1.6	ÉCOULEMENT BIPHASÉ.....	2
1.7	VIBRATIONS INDUITES PAR L'ÉCOULEMENT .....	3
<b>2</b>	<b>DÉFINITIONS DE BASE .....</b>	<b>4</b>
2.1	INTRODUCTION .....	4
2.2	PRESSION .....	4
2.3	MASSE VOLUMIQUE .....	5
2.4	VISCOSITÉ.....	5
<b>3</b>	<b>PRESSION.....</b>	<b>8</b>
3.1	ÉCHELLES DE PRESSION .....	8
3.1.1	<i>Exemple 3.1</i> .....	8
3.1.2	<i>Exemple 3.2</i> .....	9
3.1.3	<i>Exemple 3.3</i> .....	10
3.2	PRESSION DIFFÉRENTIELLE .....	10
3.2.1	<i>Exemple 3.4</i> .....	10
3.2.2	<i>Exemple 3.5</i> .....	11
3.3	FACTEURS INFLUANT SUR LA PRESSION DES FLUIDES .....	11
<b>4</b>	<b>ÉCOULEMENT.....</b>	<b>15</b>
4.1	ÉCOULEMENT LAMINAIRE ET ÉCOULEMENT TURBULENT .....	15
4.2	DÉBIT MASSIQUE ET VOLUMÉTRIQUE .....	16
4.3	LE PRINCIPE DE CONTINUITÉ .....	18
4.3.1	<i>Exemple 3.6</i> .....	18
4.3.2	<i>Exemple 3.7</i> .....	19
4.4	EFFET DE LA PRESSION ET DE LA TEMPÉRATURE .....	20
<b>5</b>	<b>L'ÉNERGIE DANS UN FLUIDE EN ÉCOULEMENT.....</b>	<b>22</b>
5.1	ÉNERGIE, PRESSION ET CHARGE D'UN FLUIDE EN ÉCOULEMENT .....	22
5.1.1	<i>Exemple 5.1</i> .....	25
5.2	PERTES D'ÉNERGIE ET DE CHARGE .....	26
5.3	LIQUIDE EN ÉCOULEMENT : CONSERVATION DE L'ÉNERGIE.....	27
5.4	VARIATION DE PRESSION/VITESSE DANS UN CIRCUIT DE FLUIDE .....	28
<b>6</b>	<b>AUTRES PHÉNOMÈNES.....</b>	<b>35</b>
6.1	SIPHON.....	35
6.2	BOUCLE D'ÉTANCHÉITÉ .....	37
6.3	FLOTTABILITÉ.....	37
<b>7</b>	<b>ÉCOULEMENT BIPHASÉ.....</b>	<b>40</b>

7.1	CAVITATION .....	41
7.2	COUP DE BÉLIER.....	43
7.3	COUP DE BÉLIER INDUIT PAR LA VAPEUR .....	45
7.4	RÉDUCTION DES COUPS DE BÉLIER (EAU OU VAPEUR) .....	47
7.5	FONCTIONNEMENT EN PHASE LIQUIDE SEULEMENT .....	48
<b>8</b>	<b>VIBRATIONS INDUITES PAR L'ÉCOULEMENT .....</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>53</b>
<b>10</b>	<b>QUESTIONS POUR LE TRAVAIL PRATIQUE.....</b>	<b>55</b>

## **1 OBJECTIFS**

### **1.1 Définitions de base**

- Définir les termes suivants et indiquer les unités de mesure correspondantes : pression, masse volumique, viscosité.

### **1.2 Pression**

- Convertir une valeur de pression donnée exprimée selon l'échelle absolue, manométrique ou vacuométrique dans la valeur appropriée de l'une ou l'autre des deux autres échelles.
- Déterminer la différence de pression agissant sur une superficie donnée et calculer la force produite.
- Énoncer les facteurs qui influent sur la pression des liquides et des gaz.

### **1.3 Écoulement**

- Décrire la différence entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent, en termes de profil de vitesse et de pulsations.
- Définir les débits massique et volumétrique.
- Énoncer la relation entre le débit massique et le débit volumétrique.
- Énoncer le principe de continuité et l'appliquer pour déterminer le changement de la vitesse d'un fluide.
- Expliquer l'effet de la pression et de la température sur le débit volumétrique des liquides et des gaz.

### **1.4 Énergie dans un fluide en écoulement**

- Définir les termes suivants, dans le contexte d'un système contenant un liquide en écoulement :
  - a) hauteur d'élévation, hauteur de pression et charge dynamique;
  - b) pression statique, pression dynamique et pression totale;
  - c) perte d'énergie et perte de charge.
- Énoncer l'effet de la viscosité et de la vitesse d'un fluide sur la perte de charge, dans un écoulement turbulent.

- Énoncer l'effet de la température sur la viscosité des liquides.
- Expliquer la relation entre la hauteur d'élévation, la hauteur de pression et la charge dynamique dans un circuit de fluide avec pertes et ajouts d'énergie.
- Dans un circuit de fluide simple composé d'une tuyauterie d'une hauteur et d'un diamètre constants ou variables et d'une combinaison de coudes, d'orifices, de venturis, de soupapes, de réservoirs et d'un mécanisme de déplacement du fluide (p. ex., une pompe), déterminer la direction des changements de pression et de vitesse dans le système, et expliquer la raison de ces changements.

### 1.5 Autres phénomènes

- Décrire les termes suivants : siphon, boucle d'étanchéité, flottabilité.
- Expliquer les effets négatifs de l'accumulation de gaz ou de vapeur dans un siphon.

### 1.6 Écoulement biphasé

- Définir l'écoulement biphasé.
- Décrire les différentes formes d'écoulement biphasé.
- Donner des exemples des différentes formes d'écoulement biphasé dans une centrale CANDU.
- Définir le terme cavitation.
- Expliquer comment la cavitation peut se produire dans un circuit de fluide.
- Expliquer comment chacune des situations précédentes peut produire des montées de pression importantes dans un circuit de fluide : coup de bélier, coup de bélier induit par la vapeur, fonctionnement en phase liquide seulement.
- Expliquer comment les pratiques d'exploitation suivantes réduisent le risque de coup de bélier induit par l'eau ou de coup de bélier induit par la vapeur :
  - a) purge du circuit de vapeur ou de gaz;
  - b) ventilation et amorçage lent d'un circuit de liquide;
  - c) ouverture/fermeture lente des soupapes;

- d) démarrage ou arrêt d'une pompe centrifuge quand sa soupape de refoulement est fermée ou à peine entrouverte;
- e) délai entre les démarrages et les arrêts des pompes;
- f) application d'eau de refroidissement aux échangeurs de chaleur en premier.

### **1.7 Vibrations induites par l'écoulement**

- Expliquer comment un fluide en déplacement peut provoquer des vibrations dans l'équipement.

## 2 DÉFINITIONS DE BASE

### 2.1 Introduction

Les circuits de fluide constituent l'épine dorsale des centrales nucléaires, dont les centrales CANDU. Dans ce cours, nous utiliserons le terme fluide dans son sens générique pour désigner tant les liquides que les gaz.

Les circuits de fluide sont utilisés surtout comme circuits caloporteurs, c'est-à-dire qu'ils servent à transporter la chaleur. Ce serait le cas par exemple du système de refroidissement d'un stator de génératrice. La chaleur produite dans les spires du stator est transférée au système de refroidissement du stator en circuit fermé, puis à l'eau de service basse pression.

Ce module vous aidera à comprendre les mécanismes en jeu dans les pièces et les dispositifs qui composent un circuit de fluide, ainsi que dans l'ensemble du système.

Dans ce module, nous présenterons les termes, les concepts et les principes de base de la mécanique des fluides, et nous les appliquerons à divers processus fluidiques dans une centrale nucléaire.

### 2.2 Pression

La pression est l'une des propriétés de base de tout fluide. La pression ( $p$ ) est la force ( $F$ ) exercée sur un fluide ou par un fluide sur une unité de surface ( $A$ ).

Cela s'exprime mathématiquement comme suit :

$$p = \frac{F}{A}$$

L'unité de base de la pression est le pascal (Pa). Si un fluide exerce une force de 1 N sur une surface de 1 m<sup>2</sup>, la pression produite est égale à un pascal, c.-à-d. 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>.

Le pascal est une unité très petite. Dans les applications types dans une centrale, nous utilisons des unités plus grandes, à savoir :

$$1 \text{ kilopascal (kPa)} = 10^3 \text{ Pa,}$$

$$1 \text{ mégapascal (MPa)} = 10^6 \text{ Pa} = 10^3 \text{ kPa.}$$

### 2.3 Masse volumique

La masse volumique (parfois appelée densité) est une autre propriété de base des fluides. La masse volumique (désignée par la lettre grecque rho –  $\rho$ ) est définie comme étant la masse ( $m$ ) d'une unité de volume ( $V$ ). Son unité de base est le  $\text{kg/m}^3$ .

Mathématiquement, cela s'exprime comme suit :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

À toute fin pratique, on considère les liquides comme étant incompressibles, c.-à-d. que la pression n'a pas d'effet sur leur volume et leur masse volumique. Bien que cela ne soit pas vrai dans l'absolu, ces modifications sont négligeables. Toutefois, on ne peut pas ignorer l'effet de la température sur la masse volumique des liquides, car les liquides se dilatent et se contractent lorsque la température change.

La pression et la température influent toutes deux sur la masse volumique des gaz. Si on garde la température constante et on augmente la pression, la masse volumique augmente. Si on garde constante la pression et on augmente la température, la masse volumique diminue.

### 2.4 Viscosité

La viscosité est une autre propriété des fluides qu'il faut bien comprendre pour décrire divers phénomènes dans les équipements mécaniques, comme les pertes de pression dans la tuyauterie dues au frottement ou à la lubrification des roulements.

La viscosité est une mesure de la résistance qu'oppose le fluide à l'écoulement, en raison de son frottement interne.

On mesure la viscosité de deux façons : dynamique (absolue) et cinématique. Ces deux paramètres sont liés entre eux, car on obtient la viscosité cinématique en divisant la viscosité dynamique par la masse volumique.

Dans ce module et afin de garder les choses simples, nous parlerons uniquement de viscosité absolue quand nous expliquerons le frottement des fluides dans les circuits de tuyauterie. Par conséquent, dans le texte qui suit, quand nous parlons de viscosité, il s'agit de viscosité dynamique.

La viscosité dynamique (ou absolue, et désignée par la lettre grecque mu –  $\mu$ ) est la mesure de la force tangentielle requise pour déplacer un plan parallèle de fluide par rapport à un autre plan parallèle de fluide. Plus le fluide est épais ou visqueux, plus grande est la surface de contact et plus grande est la vitesse entre les couches du fluide, et donc plus grande est cette force tangentielle.

L'unité de base de la viscosité est le pascal-seconde (Pa·s). La viscosité d'un fluide vaut 1 Pa·s si une force de 1 N est requise pour déplacer un plan de 1 m<sup>2</sup> du fluide quand le changement de vitesse entre les couches adjacentes du fluide est de 1 m/s sur 1 m. On utilise également une unité mille fois plus petite, appelée le centipoise (cP). Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de cette unité, disons que la viscosité de l'eau à 20°C est d'environ 1 cP.

La viscosité des liquides est beaucoup plus grande que celle des gaz ou de la vapeur. Pour tous les fluides, la viscosité augmente avec la pression. L'effet de la température est toutefois plus important, et il dépend du type de fluide : l'augmentation de température réduit la viscosité d'un liquide, tandis qu'elle accroît la viscosité d'un gaz. Nous expliquons ci-dessous cette différence.

La résistance d'un fluide au cisaillement (c.-à-d. la viscosité) dépend de sa cohésion et de la vitesse de transfert de la quantité de mouvement moléculaire. La cohésion désigne les forces d'attraction entre les molécules voisines. Quand le fluide se dilate à cause de l'augmentation de la température, les molécules s'écartent et la cohésion diminue. Le transfert de la quantité de mouvement moléculaire est dû aux mouvements aléatoires des molécules du fluide qui vont et viennent entre les différentes couches. Ce transfert tend à égaliser les vitesses des couches adjacentes, et donc s'oppose à leur mouvement relatif. Dans les liquides, les molécules sont beaucoup plus rapprochées que dans les gaz. Par conséquent, la cohésion est la cause dominante de la viscosité, et comme la cohésion diminue avec la température, il en va de même pour la viscosité. Par contre, les forces de cohésion sont très faibles dans un gaz. La majeure partie de la résistance au cisaillement dans un gaz est attribuable au transfert de quantité de mouvement moléculaire. Plus la température est élevée, plus ce transfert est grand, car les molécules se déplacent plus rapidement. Par conséquent, la viscosité d'un gaz augmente avec la température.



## 3 PRESSION

### 3.1 Échelles de pression

Comme nous vivons dans une atmosphère composée d'air sous pression, nous devons définir une pression de référence, c'est-à-dire une pression égale à zéro.

Une échelle fréquemment utilisée est l'échelle absolue. Elle débute au point zéro, c'est-à-dire la pression zéro absolue. Les lectures prises avec cette échelle sont dites lectures de pression absolue, et on ajoute le suffixe (a) comme suit : 4 MPa (a).

L'échelle dans laquelle la pression atmosphérique est zéro est appelée échelle manométrique. Les lectures faites sur cette échelle sont appelées valeurs de pression manométrique. Le terme manométrique désigne le fait que la plupart des manomètres donnent une lecture de zéro pour la pression atmosphérique. Pour distinguer les lectures faites selon cette échelle, nous leurs apposons le suffixe (g). L'échelle manométrique est la plus couramment utilisée dans nos centrales.

Comme la pression atmosphérique change constamment, il peut s'avérer difficile de déterminer exactement le point zéro de la pression manométrique. C'est pourquoi on utilise la pression atmosphérique standard, définie à 101,3 kPa(a). Comme les changements de pression atmosphérique sont relativement faibles par rapport aux pressions utilisées dans l'industrie, on peut ignorer les petites variations.

Nous pouvons maintenant établir une corrélation entre les deux échelles ci-dessus :

$$p(a) = p(g) + \text{pression atmosphérique}$$

#### 3.1.1 Exemple 3.1

Si la pression manométrique de l'instrument est de 580 kPa (g), quelle est sa pression absolue?

$$\begin{aligned} p(a) &= 580 \text{ kPa (g)} + 101,3 \text{ kPa} \\ &= 681,3 \text{ kPa (a)} \end{aligned}$$

La troisième échelle de pression, que nous utilisons parfois dans nos centrales pour les systèmes qui fonctionnent à une pression inférieure à la pression atmosphérique, est l'échelle vacuométrique. Le vide est la différence entre la pression atmosphérique et la pression absolue. Nous utilisons le suffixe (v) pour la distinguer des deux autres types de pression. Sa valeur zéro est la pression

atmosphérique standard, et elle augmente vers le zéro absolu. La pression correspondant au zéro absolu est également appelée pression absolue.

À partir de cette information, nous pouvons établir des expressions mathématiques qui relient les trois échelles :

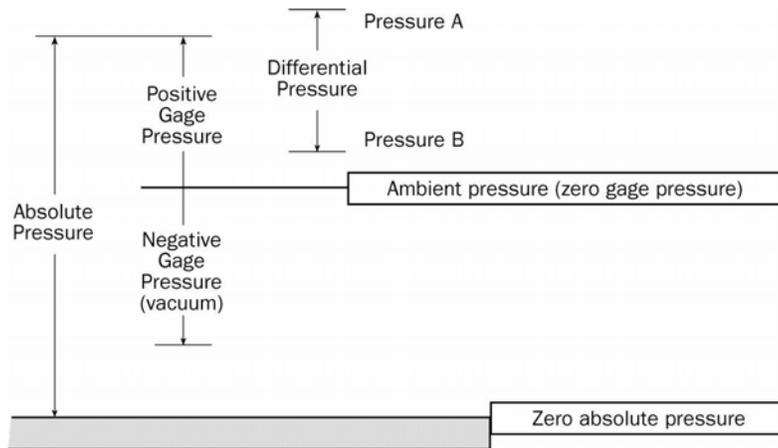
$$\text{Vide} = - \text{Pression manométrique}$$

$$\text{c.-à-d. } p(v) = - p(g)$$

$$\text{Vide} = \text{Pression atmosphérique} - \text{Pression absolue}$$

$$\text{c.-à-d. } p(v) = 101,3 \text{ kPa} - p(a)$$

Mieux encore, nous pouvons représenter graphiquement ces trois relations, comme sur la figure 1.



**Figure 1**

**REMARQUE :** Les échelles manométrique et absolue ont un point zéro, mais qui peut augmenter de façon indéfinie. Par ailleurs, l'échelle vacuométrique a un point zéro au niveau de la pression atmosphérique, mais ne peut croître que vers le vide absolu. Elle a une plage définie et finie de 101,3 kPa.

### 3.1.2 Exemple 3.2

Supposons que la lecture de la pression dans un condenseur sur l'échelle absolue soit de 4,9 kPa(a). Exprimez cette lecture dans les deux autres échelles.

Pression vacuométrique :

$$p(v) = 101,3 \text{ kPa} - p(a)$$

$$p(v) = 101,3 - 4,9 = 96,4 \text{ kPa}(v)$$

Pression manométrique :

$$p(g) = - p(v) = - 96,4 \text{ kPa}(g)$$

### 3.1.3 Exemple 3.3

L'alarme de basse pression du collecteur du modérateur se déclenche à 166 kPa(g). Exprimer cette valeur dans les deux autres échelles.

Comme la pression est à l'extérieur de l'échelle de vide, on ne peut pas utiliser l'échelle vacuométrique. La seule conversion possible est vers l'échelle absolue :

$$p(a) = p(g) + 101,3 = 166 + 101,3 = 267,3 \text{ kPa}(a)$$

## 3.2 Pression différentielle

Maintenant, nous savons comment mesurer la pression. Examinons les situations où il y a une pression ( $p$ ) ou une différence de pression ( $\Delta p$ ) exercée sur une superficie ( $A$ ) et produisant une force ( $F$ ). Nous pouvons calculer les forces en jeu en utilisant la formule de base de la pression :

Comme :  $p = \frac{F}{A}$ ,                      donc :  $F = p \cdot A$

Ou, dans le cas d'une différence de pression :

$$F = \Delta p \cdot A = (p_1 - p_2) \cdot A$$

**REMARQUE :** Il faut bien faire attention aux unités : les pressions doivent être exprimées dans la même échelle et la superficie doit être exprimée en  $m^2$ .

### 3.2.1 Exemple 3.4

Dans une vanne à commande pneumatique (*air-operated valve*, AOV), la superficie du diaphragme du récepteur est de  $0,1 \text{ m}^2$ . Quelle force minimale doit exercer le ressort sur le diaphragme pour contrer la force produite par l'air de l'instrument à étranglement, à une pression de 200 kPa(a)?

Comme le logement du ressort est à la pression atmosphérique, la différence de pression qui agit sur le diaphragme contre le ressort sera la pression manométrique de l'air dans l'instrument :

$$\begin{aligned} \Delta p = p(g) &= p(a) - 101,3 = \\ &= 200 - 101,3 = 98,7 \text{ kPa}(g) \end{aligned}$$

Par conséquent, la force produite par cette différence de pression est :

$$F = \Delta p \cdot A = 98,7 \cdot 0,1 = 9,87 \text{ N}$$

### 3.2.2 Exemple 3.5

Certaines pièces dans les centrales sont maintenues à une pression inférieure à la pression atmosphérique, soit pour empêcher la diffusion de contaminants, soit parce qu'elles font partie du système d'aspiration de gros ventilateurs. Pour entrer dans un de ces endroits, il faut fournir un certain effort pour ouvrir la porte. Par exemple, une salle de ventilateurs est maintenue à une pression d'environ 0,7 kPa. Quelle est la force exercée sur la porte par la différence de pression? La porte a une superficie d'environ 2 m<sup>2</sup>.

Nous pouvons utiliser la formule pour la différence de pression, présentée ci-dessus :

$$F = (p_1 - p_2) \cdot A$$

où  $p_1$  est la pression atmosphérique, et  $p_2$  est la pression subatmosphérique dans la salle des ventilateurs. Comme la pression atmosphérique est donnée à la pression manométrique de zéro, nous devons exprimer également la pression dans la salle des ventilateurs selon l'échelle manométrique:

$$p_2 = 0,7 \text{ kPa}(v) = -0,7 \text{ kPa}(g)$$

Substituons cette valeur dans la formule pour la force, et nous obtenons :

$$F = (p_1 - p_2) \cdot A = [0 - (-0,7)] \cdot 2 = 1,4 \text{ kN} = 1400 \text{ N}$$

La différence de pression est également importante dans certaines autres conditions, dans nos centrales.

Prenons le cas du robinet à soupapes à. En position fermée, la soupape est souvent soumise à une différence de pression. En effet, les pressions au-dessous et au-dessus de la soupape seront différentes, ce qui provoquera une force axiale le long de la tige.

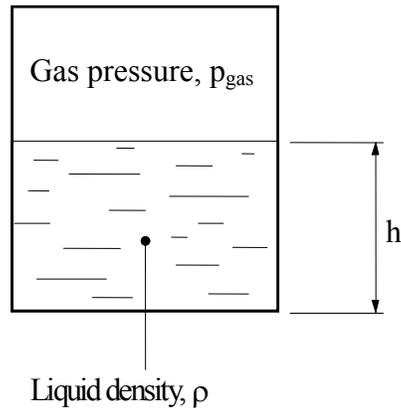
Si la pression est supérieure au-dessus de la tige, elle contribue à bien fermer la soupape. Si elle est supérieure au-dessous de la tige, elle contribue à l'ouvrir. On trouve les deux variantes dans nos centrales, tout dépendant de l'utilisation de ces soupapes.

### 3.3 Facteurs influant sur la pression des fluides

Les liquides et les gaz ont de nombreuses caractéristiques communes, mais ils diffèrent à maints autres égards. Pour ce qui est des facteurs qui influent sur leur pression, nous devons les étudier séparément. Afin de simplifier les choses, nous supposons que le fluide est stagnant, c'est-à-dire qu'il n'est pas en mouvement.

Nous traitons plus loin dans ce document de la pression des fluides en mouvement.

Débutons par les liquides. Pour étudier les pressions exercées sur et par un liquide, examinons un liquide dans une cuve partiellement remplie, avec une atmosphère gazeuse au-dessus du liquide (Figure 2).



**Figure 2**

La pression en un point de la cuve dépend des paramètres suivants :

- la pression du gaz ou de la vapeur au-dessus du liquide ( $p_{\text{gas}}$ );
- le poids du liquide au-dessus du point dont on veut calculer la pression, ce qui dépend à son tour des paramètres suivants :
  - la hauteur ( $h$ ) de la colonne de liquide/charge hydrostatique au-dessus du point,
  - la masse volumique ( $\rho$ ) du liquide,
  - l'accélération due à la gravitation ( $g$ ).

Sous forme mathématique, la pression statique d'un liquide s'exprime comme suit :

$$p = p_{\text{gas}} + \rho \cdot g \cdot h$$

Étudions maintenant les gaz. Tout gaz contenu dans un réservoir se dilatera et le remplira entièrement. Le poids du gaz est habituellement négligeable. Par conséquent, le gaz exerce une pression égale sur toutes les surfaces de la cuve. Les facteurs qui influent sur la pression du gaz sont les suivants :

- masse du gaz ( $m$ );
- température absolue ( $T$ ) — cette température est expliquée dans le cours de thermodynamique;
- volume de la cuve ( $V$ );
- constante des gaz ( $R$ ), qui varie selon les gaz.

Sous forme mathématique, nous avons la relation suivante :

$$p = \frac{m \cdot R \cdot T}{V} = \rho \cdot R \cdot T$$

C'est l'équation des gaz parfaits. Cette équation indique que la pression du gaz augmente en fonction de la masse et de la température du gaz, et diminue en fonction inverse du volume.

Jusqu'à présent, nous avons supposé que les fluides ne se déplacent pas. Dans les sections suivantes, nous allons traiter des fluides en déplacement.



## 4 ÉCOULEMENT

### 4.1 Écoulement laminaire et écoulement turbulent

Les expériences démontrent qu'un fluide se déplaçant dans un conduit (p. ex., un tuyau) peut s'écouler en sections parallèles (écoulement laminaire), ou qu'il peut y avoir un certain mélange du fluide (on parle alors d'écoulement turbulent). Nous décrivons ces deux types d'écoulement dans le cas le plus simple, soit un conduit droit de section efficace circulaire, en d'autres mots un tuyau. La figure 3 illustre la différence entre les deux types d'écoulement, selon le profil de vitesse.

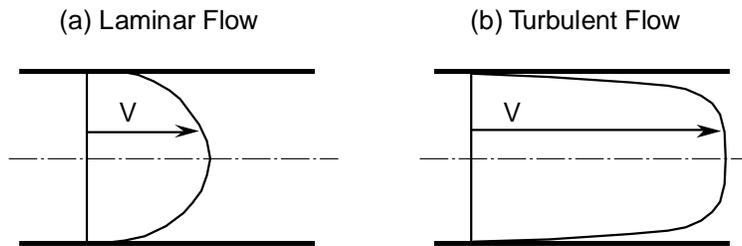


Figure 3

Dans l'écoulement laminaire, le fluide se comporte comme s'il se déplaçait en un ensemble concentrique de cylindres minces, imbriqués les uns dans les autres. En raison de la viscosité du fluide, le cylindre près de la paroi est stationnaire, tandis que celui qui se trouve au centre du tuyau se déplace avec la plus grande vitesse. Il n'y a pas de mélange entre les couches de fluide, et la vitesse ne pulse pas.

L'écoulement turbulent est caractérisé par un mélange aléatoire des couches de fluide. À cause de ce mélange, la distribution des vitesses est beaucoup plus uniforme le long de la section transversale du conduit. Le mélange a un effet positif sur le transfert de chaleur. Par contre, le mélange se traduit par la pulsation de la vitesse et de la pression. Ces pulsations peuvent être transférées à l'ensemble de la tuyauterie et à l'équipement, et provoquer des vibrations.

Le type d'écoulement (laminaire ou turbulent) dépend des propriétés du fluide (viscosité et masse volumique), de sa vitesse et de la géométrie du conduit dans lequel il s'écoule. Voici les conditions qui favorisent l'écoulement laminaire :

- la viscosité dynamique est élevée (les forces de frottement s'opposent au mélange);
- la masse volumique est faible (un volume donné de fluide contient moins d'énergie cinétique pour vaincre le frottement);
- la vitesse est faible (il y a moins d'énergie cinétique pour vaincre le frottement);

- la largeur du conduit est faible (la proximité des parois rend plus difficile le mélange – c.-à-d. le déplacement transversal dans le conduit).

Dans les centrales, la plupart des fluides (eau, vapeur et gaz comprimés) ont une faible viscosité et ils s'écoulent habituellement dans des conduits relativement larges, à vitesse élevée. De plus, ils changent souvent de direction d'écoulement (p. ex., dans un coude de tuyau ou autour des tubes d'un échangeur de chaleur), ce qui favorise le mélange des couches.

C'est pourquoi on rencontre très souvent des écoulements turbulents dans les centrales. L'écoulement laminaire est extrêmement rare. Il se produit par exemple dans la pellicule d'huile d'un roulement ordinaire, car le très faible écart entre l'arbre et la surface de roulement (quelques dizaines de millimètres tout au plus) ne permet pas le mélange des couches.

Sauf indication contraire, nous utiliserons l'expression « vitesse du fluide » pour désigner la vitesse moyenne dans le conduit. En d'autres mots, si le fluide avait cette vitesse en tous points de la section transversale du conduit, la quantité de fluide passant par celui-ci serait la même que le débit total réel.

## 4.2 Débit massique et volumétrique

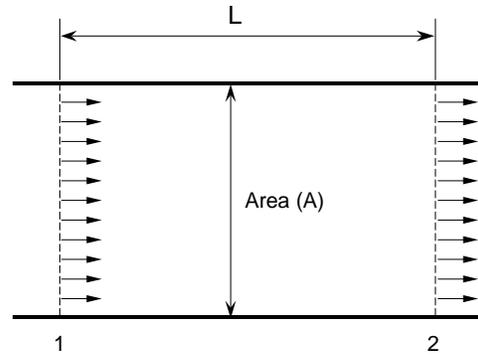
Comme nous l'avons déjà indiqué, les circuits de fluide sont essentiels au fonctionnement des centrales CANDU. Pour caractériser l'écoulement du fluide, nous devons indiquer la quantité de fluide qui s'écoule par un endroit donné dans le système, par unité de temps. C'est ce qu'on appelle le débit. Comme la quantité de fluide peut être exprimée sous forme de volume ou de masse, il y a donc deux types de débit : le débit volumétrique et le débit massique.

Le débit volumétrique ( $\dot{V}$ ) est donc le volume de fluide traversant une section transversale donnée, par unité de temps.

L'unité de base est le  $\text{m}^3/\text{s}$ . Si l'unité  $\text{m}^3/\text{s}$  est trop grande, on peut utiliser une plus petite unité, soit le  $\text{dm}^3/\text{s}$ . On utilise aussi le litre/seconde (l/s).

$$1 \text{ m}^3/\text{s} = 10^3 \text{ dm}^3/\text{s} = 10^3 \text{ l/s}$$

Le débit volumétrique est fonction de la vitesse du fluide ( $v$ ) et de la section transversale du conduit dans laquelle le fluide s'écoule, c.-à-d. un tuyau ( $A$ ). La figure 4 illustre la notion de débit volumétrique dans le cas simple d'un tuyau droit.



**Figure 4**

Prenons deux sections transversales, 1 et 2, dans le tuyau. La distance entre ces sections est  $L$ . Examinons une couche de fluide qui traverse la section 1, puis un peu plus tard, la section 2 après avoir parcouru une distance  $L$ . En supposant que toutes les particules du fluide se déplacent à la même vitesse, nous concluons que le volume de fluide qui a traversé la section 1 est :

$$V = A \cdot L$$

Par unité de temps, nous obtenons :

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{A \cdot L}{t}$$

Comme  $L/t$  est la vitesse moyenne du fluide ( $v$ ), le débit volumétrique peut donc s'exprimer comme suit :

$$\dot{V} = A \cdot v$$

Par ailleurs, le débit massique ( $\dot{m}$ ) est la masse de fluide qui traverse une section transversale donnée, par unité de temps. Son unité de base est le kg/s.

Nous pouvons dériver la formule du débit massique en utilisant la formule pour le débit volumétrique, et en convertissant le volume en masse en utilisant la masse volumique  $\rho$ .

Comme  $\rho = \frac{m}{V}$ , alors  $m = V \cdot \rho$ .

Si nous divisons les deux membres de l'équation ci-dessus par le temps, nous obtenons des débits. La formule finale du débit massique est donc :

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = A \cdot v \cdot \rho$$

Bien que nous avons pris l'exemple d'un tuyau pour cette discussion des débits, ce concept s'applique de la même manière à tous les systèmes, peu importe la forme de leurs sections transversales, p. ex., ce peut être le cas des conduits rectangulaires.

On utilise fréquemment les deux types de débit pour caractériser les conditions dans les systèmes de nos centrales. Dans les deux sections suivantes, nous traitons des facteurs qui influent sur ces débits. Ces connaissances vous aideront, dans vos activités régulières, à prévoir ce qui arrive à ces débits quand on modifie un paramètre d'un système, ou encore à diagnostiquer les causes d'un changement de débit.

### 4.3 Le principe de continuité

Le principe de continuité est l'une des lois de base de la mécanique des fluides. La figure 4 nous permet de tirer la conclusion suivante :

S'il n'y a pas de fuite, ou s'il n'y a pas d'apport ou de perte de fluide entre les sections transversales 1 et 2 et si rien ne modifie la quantité de fluide entre ces deux endroits, la masse de fluide qui passe par la section transversale 1 doit également passer par la section transversale 2 dans le même laps de temps.

Nous pouvons généraliser ce constat en le formulant comme suit : le débit massique dans un système doit être constant à toutes les sections transversales, en autant qu'il n'y ait pas de fuite, d'apport, de perte ou de stockage du fluide.

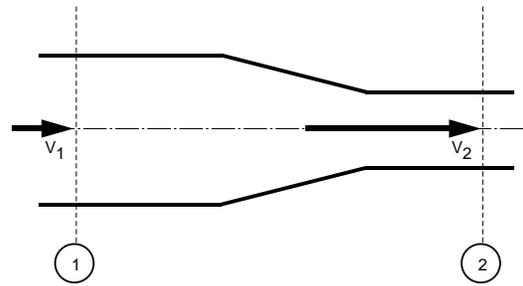
Mathématiquement, on peut exprimer cette loi comme suit :

$$\dot{m} = \text{constant} \quad \text{ou} \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Intuitivement, nous pensons que si le débit massique est constant au travers de toutes les sections efficaces, peu importe que celles-ci soient petites ou grandes, alors quelque chose d'autre doit changer. Pour simplifier les choses, nous examinerons seulement les liquides à une température constante. Les deux exemples suivants nous aideront à comprendre ce concept.

#### 4.3.1 Exemple 3.6

La figure 5 est un exemple de réducteur de tuyau. Nous voulons savoir ce qui se passe aux sections transversales 1 et 2.



**Figure 5**

Selon le principe de continuité, le débit massique aux sections 1 et 2 doit être identique, c.-à-d. :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Nous avons exprimé le débit massique sous la forme suivante :

$$\dot{m} = A \cdot v \cdot \rho$$

En insérant cette équation dans l'équation de continuité, nous obtenons :

$$A_1 \cdot v_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot v_2 \cdot \rho_2$$

Comme la masse volumique du liquide ne change pas, c.-à-d.  $\rho_1 = \rho_2$ , l'équation ci-dessus devient :

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Conclusion : Comme la section efficace  $A_2$  est plus petite que  $A_1$ , la vitesse  $v_2$  doit être plus élevée que  $v_1$  pour maintenir le débit massique.

#### 4.3.2 Exemple 3.7

La figure 6 illustre une pompe centrifuge, dont le tuyau d'aspiration est de même diamètre que le tuyau de refoulement. Déterminons la vitesse de changement entre les parties aspiration et refoulement.

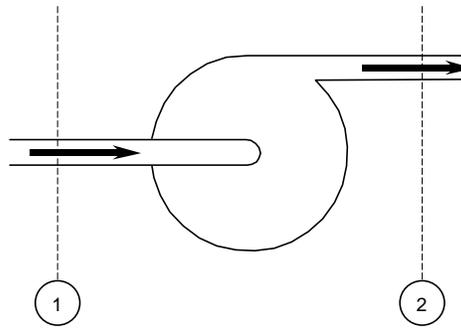


Figure 6

Nous supposons qu'aucun liquide n'est ajouté, enlevé ou stocké dans la pompe. Par conséquent, les débits massiques sont identiques aux points d'aspiration et de refoulement de la pompe. Le principe de continuité s'applique donc, c.-à-d. :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$A_1 \cdot v_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot v_2 \cdot \rho_2$$

Comme  $A_1 = A_2$  et  $\rho_1 = \rho_2$ , nous en déduisons que  $v_1 = v_2$ , c.-à-d. que les vitesses d'aspiration et de refoulement sont égales.

#### 4.4 Effet de la pression et de la température

Nous avons indiqué que le principe de continuité pour le débit massique est d'application universelle. En effet, il est tout aussi valable pour les liquides et les gaz, même si la pression et la température changent dans le système. Toutefois, on ne peut pas dire la même chose pour ce qui est du débit volumétrique. Nous devons ici tenir compte du type de fluide : un liquide ou un gaz. Nous devons également déterminer si c'est la pression ou la température qui a changé, ou si les deux ont changé.

Examinons tout d'abord l'effet de la pression sur les circuits de liquide. Comme les liquides sont, à toute fin pratique, incompressibles, leur masse volumique et donc leur débit volumétrique ne changent pas.

Par ailleurs, les gaz sont compressibles. Une augmentation de la pression fera donc diminuer le débit volumétrique, tandis qu'une diminution de la pression permettra au gaz de se dilater, ce qui accroîtra le débit volumétrique.

La température a le même effet sur les liquides et les gaz. En effet, les liquides et les gaz se dilatent quand la température augmente, ce qui se traduira par une augmentation du débit volumétrique. Une diminution de température aura l'effet inverse.



## 5 L'ÉNERGIE DANS UN FLUIDE EN ÉCOULEMENT

### 5.1 Énergie, pression et charge d'un fluide en écoulement

Dans cette section, nous traitons des divers types d'énergie mécanique que possède un fluide en écoulement, et des relations entre ces formes d'énergie. Vous pourrez ainsi comprendre les changements de pression et de vitesse qui se produisent quand un fluide s'écoule dans un système.

Prenons d'abord un cas simple, c.-à-d. celui d'un fluide sans frottement (viscosité nulle) s'écoulant dans un tuyau horizontal rectiligne (Figure 7). Plus loin dans ce module, nous examinerons des circuits de fluide plus complexes, dans lesquels s'écoule un fluide visqueux.

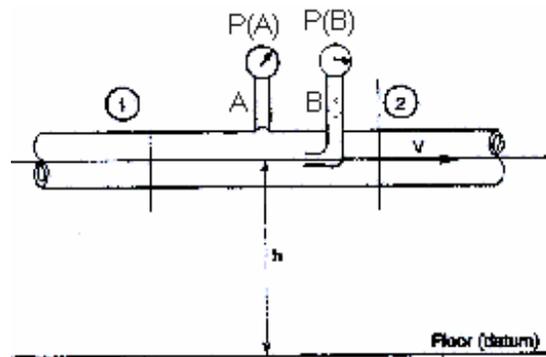


Figure 7

Dans le tuyau, le fluide possède plusieurs types d'énergie :

- énergie potentielle due à sa hauteur;
- énergie de pression parce que le liquide est sous pression;
- énergie cinétique parce qu'il se déplace;
- énergie thermique due à sa température et à sa phase (liquide ou gaz).

Le fluide contient également d'autres formes d'énergie (p. ex., énergie chimique), mais elles sont habituellement constantes et on peut donc les ignorer.

Dans le cas des liquides, on peut également ignorer l'énergie thermique, car celle-ci change très peu, à moins que le liquide ne subisse un processus de transfert thermique dans un échangeur de chaleur. Voici pourquoi. Comme les liquides sont très peu compressibles, il faut habituellement exercer relativement peu de travail pour pressuriser un liquide, tout comme quand on comprime un ressort très rigide, qui bougera très peu même si on applique une grande force.

Comme une quantité relativement faible d'énergie est ajoutée au liquide pendant ce processus, son énergie thermique (et donc sa température) augmente très peu.

Par contre, en raison de leur grande compressibilité, la vapeur et les gaz connaissent des changements d'énergie thermique beaucoup plus grands que les liquides, pour une même modification de pression. Dans le cas de ces fluides compressibles, on doit tenir compte de la chaleur. Pour simplifier les choses, nous allons nous concentrer sur les liquides dans le reste de ce module.

Dans ce cas-ci, chacune des trois formes d'énergie que possède le liquide en écoulement peut être convertie en l'une ou l'autre des deux autres. De tels changements surviennent constamment dans les circuits de fluide.

Il est habituel de convertir les trois formes d'énergie en hauteur équivalente du liquide en mètres : hauteur d'élévation ( $h_e$ ), hauteur de pression ( $h_p$ ) et charge dynamique ( $h_v$ ). La figure 7 les illustre les trois.

La hauteur d'élévation représente, comme son nom l'indique, la hauteur du fluide au-dessus d'un point de référence arbitraire. Dans la pratique, nous travaillons toujours avec des différences de hauteur, de sorte que le point de référence à partir duquel nous travaillons n'est pas important, en autant qu'il soit appliqué de manière constante. Dans la figure 7, c'est le bas de la figure qui sert de point de référence, et  $h_e$  est mesuré au milieu du tuyau.

Cette charge est proportionnelle à l'énergie potentielle du liquide, mesurée par rapport à ce niveau de référence.

La hauteur de pression est la hauteur d'une colonne de liquide qui peut être soutenue par la pression du liquide. Cette charge est mesurée par rapport à l'axe central du conduit, comme l'illustre la figure 7, pour la pression dans le tube A.

On utilise habituellement la pression atmosphérique comme pression de référence. Par conséquent, la hauteur de pression est égale à zéro quand le liquide est à la pression atmosphérique.

La charge dynamique est la hauteur d'une colonne de liquide qui peut être soutenue quand le liquide est arrêté (comme le fait le tube vertical B à la figure 7), c'est-à-dire quand l'énergie cinétique est convertie en énergie potentielle.

Cette charge est proportionnelle à l'énergie cinétique du fluide en déplacement. Si le fluide ne se déplace pas, la charge dynamique est zéro.

La somme des trois charges (hauteur d'élévation, charge dynamique et hauteur de pression) est la charge totale ( $h_t$ ).

$$h_e + h_p + h_v = h_t$$

Nous allons maintenant dériver les formules pour la hauteur de pression et la charge dynamique. Il n'y aura pas de question sur cette dérivation dans les tests. Ces formules indiquent la relation entre les deux charges et la densité de pression

et la vitesse des liquides. Les formules seront fréquemment utilisées dans ce module et le module suivant.

La relation entre la hauteur de pression et la pression peut être établie à partir de la formule de la pression hydrostatique exercée par une colonne de liquide d'une hauteur donnée ( $h_p$  dans ce cas-ci).

$$p = \rho \cdot g \cdot h_p$$

Par conséquent, la hauteur de pression est :

$$h_p = \frac{p}{\rho \cdot g}$$

On peut dériver la formule pour la charge dynamique à partir de la loi de conservation de l'énergie appliquée à un liquide qui pénètre dans un tuyau ou un tube vertical (comme à la figure 7), et dans lequel il est ralenti jusqu'à devenir immobile. Abstraction faite du frottement, on peut déduire que pendant ce processus, l'énergie cinétique du liquide est transformée complètement en énergie potentielle, c.-à-d. :

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot g \cdot h_e$$

Par conséquent :

$$h_e = \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Comme l'énergie cinétique d'un fluide en déplacement peut être transformée en énergie de pression, on peut en déduire que la vitesse du fluide peut influencer sur les lectures de pression. Par exemple, si nous mesurons les pressions dans les tubes A et B dans le système illustré à la figure 7, le manomètre B indiquera une pression plus élevée, parce que le fluide en déplacement poussera le fluide à l'intérieur du manomètre. Cette observation nous mène donc à définir les différents types de pression exercée par un fluide en déplacement : statique, dynamique et totale.

La pression statique ( $p_s$ ) est la pression exercée par un fluide statique. Quand un fluide est en déplacement, la pression statique doit être mesurée sur un plan parallèle à l'écoulement local du fluide (p. ex., l'entrée du tube vertical A, à la figure 7). À cause de cette orientation, le fluide en écoulement n'entre pas la colonne stagnante, ni n'en sort. Par conséquent, la vitesse du fluide n'a pas d'effet sur la mesure de pression. C'est la pression mesurée par les manomètres dans une centrale.

La pression dynamique ( $p_d$ ) est l'augmentation nette de pression qui peut être obtenue par conversion complète de la charge dynamique en hauteur de pression ou, en d'autres mots, de l'énergie cinétique en énergie de pression. Pour réaliser

cette conversion d'énergie, le manomètre doit être installé de telle sorte que son entrée soit perpendiculaire à la direction de l'écoulement, et pointe contre celui-ci.

La pression totale ( $p_t$ ) est la pression exercée sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement locale (l'entrée du tube vertical B à la figure 7). Elle est égale à la somme des pressions statique et dynamique, c.-à-d. :

$$p_t = p_s + p_d$$

Comme on le voit à la figure 7, la notion de charge est applicable seulement aux liquides. En effet, à la différence des liquides, les gaz et la vapeur remplissent entièrement les contenants. Par conséquent, un gaz ne créerait pas de colonne stagnante d'une certaine hauteur dans un tube de mesure (A ou B à la figure 7), mais se diffuserait plutôt dans ce tube.

Les concepts de pression statique, dynamique et totale s'appliquent toutefois à tous les types de fluides, et non exclusivement aux liquides.

Il faut absolument bien saisir la notion d'équivalence entre l'énergie (par kilogramme de fluide), la pression et la charge. On utilise sans distinction ces trois notions pour décrire l'état opérationnel des composants et des systèmes dans nos centrales. L'exemple suivant nous aidera à comprendre ce point.

### 5.1.1 Exemple 5.1

La vitesse d'écoulement moyenne dans nos circuits d'eau est d'environ 5 m/s. Quelles sont la charge dynamique et la pression dynamique équivalentes, en supposant que la masse volumique de l'eau ( $\rho$ ) est de 1 000 kg/m<sup>3</sup>?

Charge dynamique :

$$h_v = \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{5^2}{2 \cdot 9,81} \cong 1,27 \text{ m}$$

La pression dynamique ( $p_d$ ) équivalente est la pression exercée par une colonne d'eau dont la hauteur est égale à la charge dynamique, c.-à-d. :

$$p_d = \rho \cdot g \cdot h_v = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,27 \cong 12\,500 \text{ Pa} = 12,5 \text{ kPa}$$

Que nous disent ces chiffres?

Tout d'abord, examinons la grandeur de la charge dynamique/pression dynamique. Avec nos vitesses habituelles dans les systèmes de liquide, la pression dynamique est environ un huitième de la pression atmosphérique. Par conséquent, la pression atmosphérique pourrait soutenir une colonne d'eau à la température de la pièce d'environ 10 mètres de haut. De nombreux systèmes fonctionnent à des pressions beaucoup plus élevées.

Par exemple, la pression moyenne dans le système de transport de chaleur est d'environ 9,6 MPa, c.-à-d. presque 800 fois plus que la pression dynamique que nous venons de calculer. La pression des chaudières ( $\cong 4,2$  MPa) est environ 320 fois plus élevée. Même la pression dans le circuit d'eau de service à basse pression ( $\cong 600$  kPa) est 48 fois plus élevée que sa pression dynamique. Nous pouvons donc déduire que la pression dynamique représente habituellement une très petite partie de la pression totale.

En deuxième lieu, la charge dynamique et la pression dynamique changent avec le carré de la vitesse du liquide. Par exemple, si la vitesse double, la charge dynamique équivalente et la pression dynamique quadruplent.

En troisième lieu, la formule utilisée dans l'exemple ci-dessus pour la pression dynamique est incorrecte pour les gaz et la vapeur. En effet, la compressibilité de ces derniers signifie que quand la pression dynamique augmente (c.-à-d. quand le liquide ralentit), leur masse volumique et leur température augmentent, tandis qu'elles demeurent pratiquement constantes pour les liquides.

Il ne faut pas oublier que cette section porte sur des fluides sans frottement. Comme les fluides utilisés dans les centrales sont visqueux, nous devons donc examiner les pertes d'énergie et de charge attribuables au frottement.

## 5.2 Pertes d'énergie et de charge

La loi de conservation de l'énergie est d'application universelle. Nous avons également démontré que les divers types d'énergie dans un fluide en écoulement peuvent se transformer en une et l'autre forme. Par conséquent, qu'entend-on par pertes d'énergie et de charge?

La viscosité engendre du frottement dans le fluide, ainsi qu'entre le fluide et les parois du tuyau ou de la canalisation. Ce frottement a pour effet de convertir en chaleur une partie de l'énergie de pression du fluide en déplacement, et d'augmenter la température du fluide et de la tuyauterie. Ce phénomène peut être critique dans le fonctionnement de certaines pièces d'équipement.

Par exemple, on ne devrait pas faire fonctionner une pompe d'alimentation de chaudière avec une soupape de refoulement fermée. L'agitation de l'eau d'alimentation dans la pompe produirait tellement de chaleur, à cause du frottement, que la pompe serait détruite si on la laissait fonctionner avec la soupape fermée pendant trop longtemps. Dans certains cas, les dommages peuvent survenir en moins d'une minute!

La grandeur des pertes d'énergie/charge due au frottement dépend de plusieurs facteurs. Nous présenterons ici les trois principaux facteurs : la vitesse du fluide, son mode d'écoulement et sa viscosité.

L'effet de la vitesse est important, parce que dans un écoulement turbulent, les pertes par frottement augmentent avec le carré de la vitesse. Par exemple, si la vitesse double, la perte de charge quadruple.

Pour une vitesse donnée, la perte de charge augmente quand l'écoulement est perturbé. Cela se produit aux endroits où l'écoulement change de direction et/ou de vitesse, ou se mélange avec un autre écoulement ou un fluide stagnant. Par exemple, dans les coudes, les tés, les réducteurs et les diffuseurs, et les raccords de tuyauterie sur les cuves et autres réservoirs. Divers dispositifs – tubes d'échangeur de chaleur, pales de turbine et de compresseur, robinets de pompe et de ventilateur, orifices, buses et soupapes (notamment quand il y a étranglement) – perturbent l'écoulement, car ils obligent le fluide en déplacement à changer de direction et/ou vitesse. Dans tous ces cas, la turbulence du fluide (mélange interne) augmente. En outre, le profil de vitesse de l'écoulement n'est pas aussi lisse que celui qui est illustré à la figure 3. Des tourbillons se forment dans le fluide, et leur interaction avec le fluide environnant accroît le frottement.

L'effet de la viscosité est prévisible. La perte de charge augmente avec la viscosité : en d'autres mots, plus le fluide est épais, plus les pertes sont importantes.

### 5.3 Liquide en écoulement : conservation de l'énergie

Nous avons examiné tous les types d'énergie que peut posséder un liquide en écoulement, y compris les pertes dues au frottement du fluide :

- énergie potentielle/hauteur d'élévation;
- énergie de pression/hauteur de pression;
- énergie cinétique/charge dynamique;
- perte par frottement/perte de charge.

Nous avons également indiqué que ces énergies peuvent être converties d'une forme à l'autre.

Appliquons maintenant la loi de conservation de l'énergie au système illustré à la figure 8.

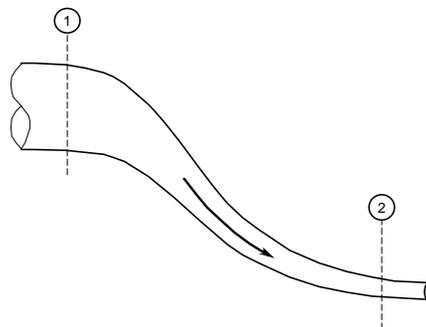


Figure 8

Si aucune énergie ne pénètre ou ne quitte le système, la somme des énergies/charges à la section transversale 1 devrait être égale à leur somme à la section transversale 2. De fait,

une partie de l'énergie utile qui pénètre la section transversale 1 aura été convertie/perdue en chaleur, en raison du frottement du fluide entre les points 1 et 2.

Si nous ajoutons ou enlevons une partie de l'énergie/charge entre les sections transversales 1 et 2, nous devons en tenir compte. Par exemple, l'ajout d'énergie pourrait se faire par pompage entre les points 1 et 2, tandis qu'un exemple de retrait d'énergie pourrait se faire par extraction de chaleur (refroidissement) entre les points 1 et 2.

Nous pouvons maintenant écrire une formule simple qui exprime cette conservation de l'énergie :

$$h_{e1} + h_{p1} + h_{v1} + h_{ajouté} - h_{enlevé} = h_{e2} + h_{p2} + h_{v2} + h_{perte}$$

Cette équation est couramment appelée équation de Bernoulli.

Nous pouvons substituer dans cette équation les expressions pour les énergies/charges diverses, et récrire cette équation, tous les termes étant exprimés en mètres :

$$h_{e1} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_{ajouté} - h_{enlevé} - h_{perte} = h_{e2} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g}$$

#### 5.4 Variation de pression/vitesse dans un circuit de fluide

Nous utiliserons les concepts présentés à la section précédente afin de démontrer de manière graphique, avec des lignes de niveau, ce qui arrive à la pression et à la vitesse d'un liquide dans un système réel composé de coudes, de réducteurs, d'orifices, de venturis, de soupapes, de réservoirs et de pompes. Nous débuterons par les différents composants du système, et nous appliquerons nos conclusions à un système simple.

Nous utiliserons deux lignes de niveau différentes : la première présente l'énergie totale (ligne d'énergie), et l'autre l'énergie de pression (la ligne de pression).

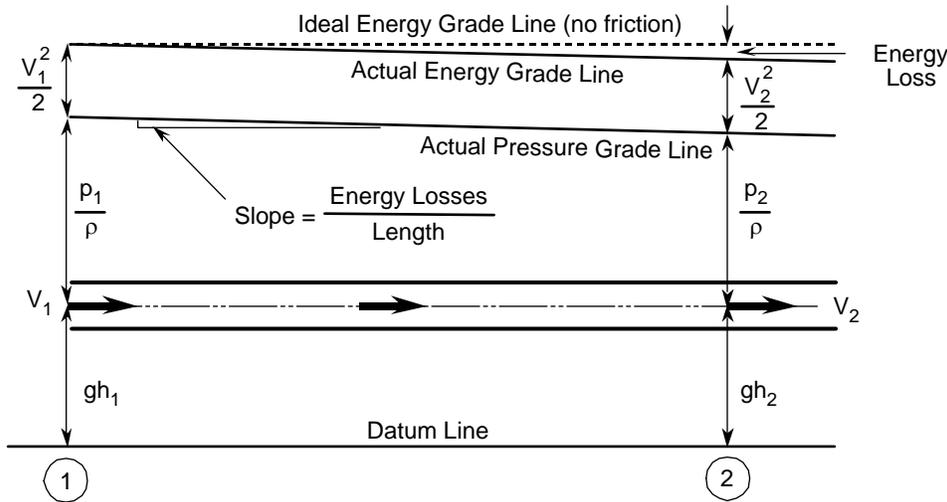
La ligne d'énergie est tracée par rapport à un point de référence horizontal, où l'énergie potentielle est égale à zéro. La distance verticale entre ce niveau de référence et l'axe central du conduit représentent l'énergie potentielle du liquide ( $gh$ ). Par conséquent, la distance verticale entre l'axe central du conduit et la ligne d'énergie illustrent la somme de la pression ( $p/\rho$ ) et de l'énergie cinétique ( $v^2/2$ ).

La ligne de pression est tracée par rapport à l'axe central du conduit et représente l'énergie de pression. Par conséquent, la distance verticale entre les deux lignes de niveau représente l'énergie cinétique du liquide.

Faisons un bref rappel sur l'équivalence entre l'énergie, la pression et la charge du liquide. Nous pouvons conclure, d'après notre discussion précédente, que la ligne de pression représente également la charge de pression, ou la pression statique. La ligne d'énergie représente la somme des diverses charges : hauteur d'élévation, hauteur de pression et charge dynamique. La hauteur d'élévation est sous l'axe

central du conduit; les deux autres sont au-dessus. Par conséquent, la hauteur de la ligne d'énergie au-dessus de l'axe central du conduit représente la pression totale, tandis que la distance verticale entre les deux lignes de niveau représente la pression dynamique/charge dynamique.

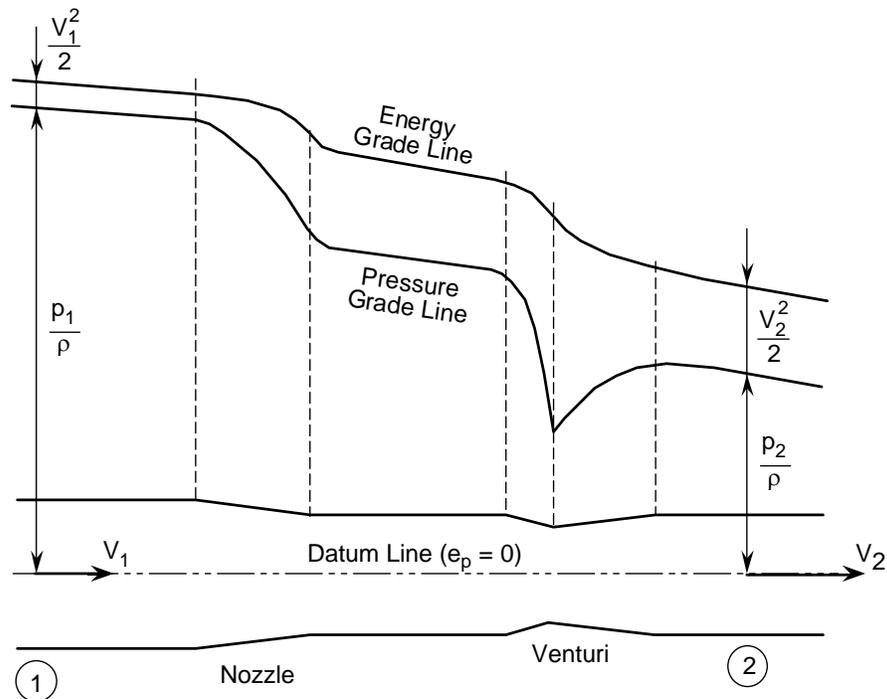
La figure suivante illustre ce concept de lignes de niveau. Pour plus de clarté, nous exagérons la composante énergie cinétique. La figure 9 illustre une section rectiligne d'un tuyau de diamètre constant.



**Figure 9**

Nous allons maintenant discuter de ce qui se passe entre les sections transversales 1 et 2. Il est manifeste que le diamètre ne change pas; par conséquent la vitesse et la charge dynamique ne changeront pas. De la même manière, il n'y a pas de changement de la hauteur d'élévation. Comme nous n'ajoutons ni n'extrayons aucune énergie, l'énergie/charge totale doit être identique aux points 1 et 2. Cependant, les pertes par frottement augmenteront progressivement le long du tuyau. Cela signifie que la pression et la charge de pression diminueront également de manière graduelle.

Nous allons maintenant discuter de quelques composants installés dans le système, soit un réducteur et un venturi dans une section de tuyau horizontal droit (Figure 10).

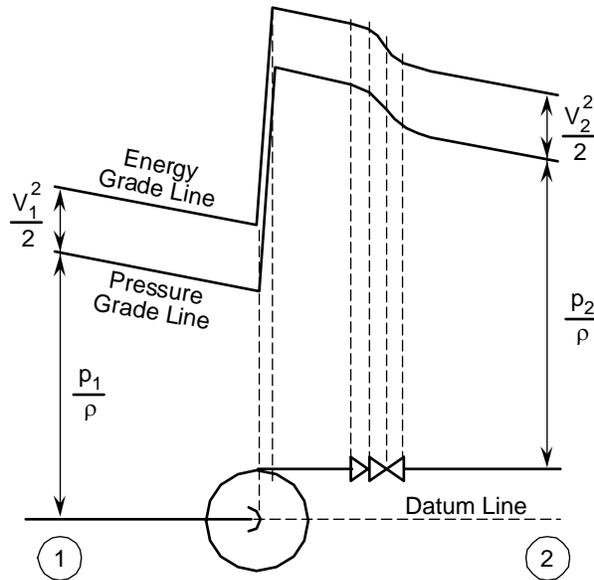


**Figure 10**

La ligne d'énergie va vers le bas, à cause de l'accumulation des pertes par frottement. Les pertes sont beaucoup plus prononcées au niveau du réducteur, à cause de l'augmentation de la vitesse et de la réduction du diamètre, cette réduction perturbant le profil de l'écoulement. Cet effet perturbateur se poursuit sur une certaine distance après le réducteur, car l'écoulement prend un certain temps à se stabiliser. La ligne de niveau est incurvée vers le bas parce que les pertes par frottement sont fonction du carré de la vitesse, et que la vitesse augmente à mesure que le liquide s'écoule par le réducteur.

La ligne de pression est parallèle à la ligne d'énergie dans la section du tuyau qui est de diamètre constant, car l'énergie cinétique y est également constante. Elle diminue plus rapidement dans la section du diffuseur, car une partie de l'énergie est convertie en énergie cinétique. Cette ligne de niveau est incurvée vers le bas davantage que l'autre ligne de niveau, parce que l'énergie cinétique, tout comme les pertes par frottement, est également proportionnelle au carré de la vitesse.

Dans la section rectiligne suivante du tuyau, la pente des deux lignes de niveau est plus prononcée que dans la section droite initiale du tuyau, car le diamètre est plus petit et les vitesses sont plus élevées. Par conséquent, dans le venturi, les lignes de niveau diminueront initialement en raison de la diminution du diamètre et de l'accroissement de la vitesse. De nouveau, leur courbe s'explique pour la même raison que pour le réducteur. Dans la partie expansion du venturi, la vitesse diminue à cause de l'augmentation du diamètre et parce qu'une certaine partie de l'énergie cinétique/charge dynamique est reconvertie en pression. Toutefois, cette récupération n'est pas complète, car une partie de l'énergie de pression est perdue à cause du frottement dans le venturi.

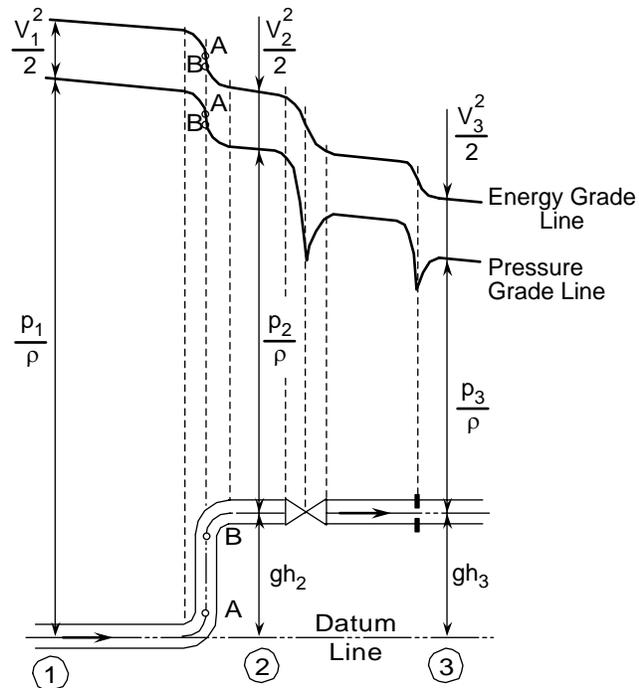


**Figure 11**

Examinons ensuite le comportement du système en présence d'une pompe centrifuge dans une structure horizontale, avec une clapet antiretour à étranglement, selon la figure 11. La pompe a le même diamètre de tuyauterie côté aspiration et côté refoulement.

Dans la pompe, les deux lignes de niveau montent rapidement, à cause de l'énergie ajoutée par la pompe dans le liquide. Bien que la vitesse change à l'intérieur de la pompe, elle demeure constante avant et après la pompe, parce que le diamètre de la tuyauterie est identique. (Pour le moment, nous ignorons les changements de vitesse à l'intérieur de la pompe.) Les deux lignes de niveau présentent un fléchissement important à la hauteur du clapet, à cause de l'augmentation des pertes par frottement. En règle générale, l'écoulement dans les clapets et les soupapes est très perturbé. En effet, le fluide doit changer de direction et la section efficace change parfois à plusieurs reprises. La charge dynamique augmente dans les clapets et soupapes et elle diminue après ceux-ci, dans la tuyauterie de plus grand diamètre. On constate une certaine reprise de la pression, pour les raisons similaires à celles qui ont été mentionnées précédemment pour le venturi.

La figure 12 illustre un circuit avec un tuyau de diamètre constant et deux coudes à 90°. De plus, ce système comporte une soupape et un orifice.



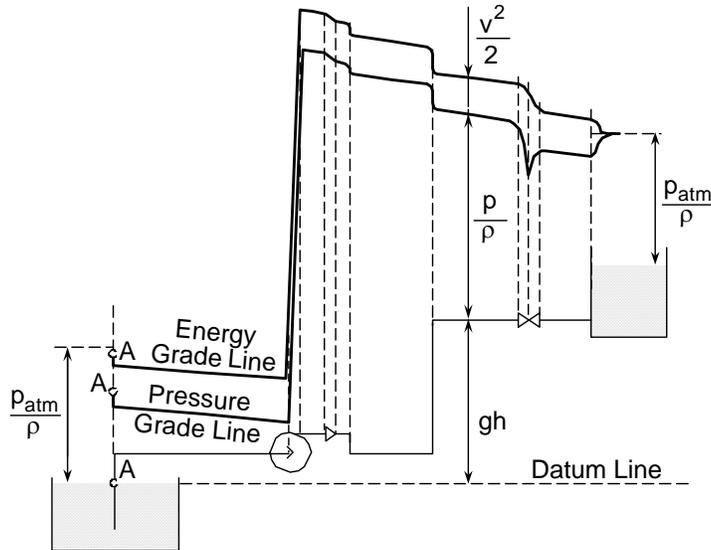
**Figure 12**

La ligne d'énergie fléchit progressivement le long des sections horizontales du tuyau. Les fléchissements les plus prononcés sont attribuables à des pertes par frottement accrues dans les deux coudes, la soupape et l'orifice.

La hauteur d'élévation augmentera au niveau de la section verticale, entre les points A et B. Comme il y a certaines pertes par frottement dans cette section, les lignes de niveau d'énergie et de pression diminuent également entre ces deux points.

La charge dynamique augmente temporairement à l'intérieur de la soupape et de l'orifice, parce que les passages sont plus étroits. Une partie de la baisse de pression dans la soupape et l'orifice sera récupérée.

Enfin, nous pouvons mettre ensemble tous les exemples ci-dessus. La figure 13 illustre un système simple, avec les lignes d'énergie et de pression correspondantes.



**Figure 13**

Dans cet exemple, on utilise l'échelle de pression absolue, à cause de la pression subatmosphérique dans la conduite d'aspiration de la pompe. Cette pression est inférieure à la pression atmosphérique, à cause de l'emplacement de la pompe au-dessus du niveau du réservoir d'aspiration et des pertes par frottement à l'entrée du tuyau d'aspiration et à l'intérieur de celui-ci. Si nous avons utilisé l'échelle de pression manométrique, la pression dans la conduite d'aspiration aurait été négative. La ligne de pression correspondante serait inférieure à la ligne de référence, ce qui rendrait le dessin moins clair.

Vous noterez également que l'énergie totale à la surface du liquide dans le réservoir d'aspiration est égale à l'énergie de pression, car le liquide est stationnaire (pas d'énergie cinétique) et situé sur la ligne de référence (pas d'énergie potentielle). L'énergie totale au point A, qui se trouve à l'intérieur de la tuyauterie d'aspiration, est réduite à cause du frottement qui se produit en aval du point A. La pression à ce point est inférieure à la pression atmosphérique, car une partie de l'énergie de pression est perdue par frottement, et une partie est convertie en énergie cinétique.

Il y a également des pertes par frottement à l'entrée du réservoir de refoulement, où le liquide qui quitte le tuyau se mélange avec le liquide dans le réservoir. Ces pertes font que la ligne d'énergie est au niveau de la pression atmosphérique. Comme le liquide perd de l'énergie cinétique, l'énergie de pression augmente, bien que cette conversion soit atténuée par les pertes par frottement. À la surface du liquide dans le réservoir où la vitesse est à peu près nulle, les deux lignes de niveau se rejoignent.

L'énergie cinétique du liquide en écoulement est exagérée dans ce dessin, afin de mieux en clarifier le concept. Dans un système réel, les deux lignes de niveau sont beaucoup plus près l'une de l'autre.

Ceci termine la section sur l'échange d'énergie dans les circuits de fluide. Ces quelques notions devraient vous aider à comprendre les changements qui se produisent en termes de pression et de vitesse du liquide quand les conditions dans un système changent (p. ex., la position de la soupape).

Cette description porte sur les circuits de liquides. Le comportement des vapeurs et des gaz est plus complexe, à cause de leur compressibilité, ce qui influe sur leur masse volumique et fait changer la température (et donc l'énergie thermique) pendant les phases de compression ou de dilatation. La prise en charge de ces deux variables est compliquée et va au-delà des objectifs du présent cours.

## 6 AUTRES PHÉNOMÈNES

### 6.1 Siphon

Le système illustré à la figure 14 est appelé un siphon. Un siphon fait monter le liquide à une hauteur plus élevée que sa surface libre, puis le rejette à une hauteur plus basse que le niveau du liquide. Le point supérieur (S) du siphon est le sommet.

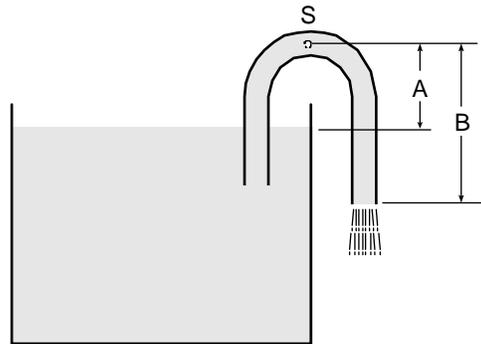


Figure 14

Le principe de fonctionnement du siphon est simple : la gravité attire vers le bas le liquide à la sortie du tuyau. Cela crée une basse pression au sommet (S) du coude du tuyau. La pression atmosphérique pousse alors le liquide libre, du réservoir vers le siphon. Pour compenser les pertes par frottement, B doit être plus grand que A. Plus grande est la différence, plus le liquide s'écoule rapidement.

Il faut bien comprendre que le siphon permet de sauver énormément de travail. En effet, c'est la pression atmosphérique et la gravité qui font le travail qui, sinon, devrait être réalisé par des moteurs électriques faisant fonctionner des pompes.

Le rendement du siphon est limité par la basse pression qui se produit près du sommet. Un siphon ne fonctionne pas très bien quand la pression au sommet est près de la pression de vapeur du liquide siphonné. Quand la pression du sommet est inférieure à la pression de vapeur, il y aura une ébullition locale du liquide au sommet et la vapeur interrompra le fonctionnement du siphon. Avant même que la pression de vapeur ne soit atteinte, les gaz dissous dans le liquide peuvent s'en dégager. La solubilité des gaz dans le liquide diminue quand la pression baisse. Les gaz peuvent alors être expulsés de la solution sous forme de bulles – un processus familier qui se produit par exemple quand on ouvre une bouteille d'une boisson gazeifiée.

À cause de leur faible masse volumique, les gaz relâchés et la vapeur s'accumuleront au sommet. C'est le phénomène de flottabilité que nous expliquerons dans quelques lignes. En remplissant la partie supérieure du tuyau,

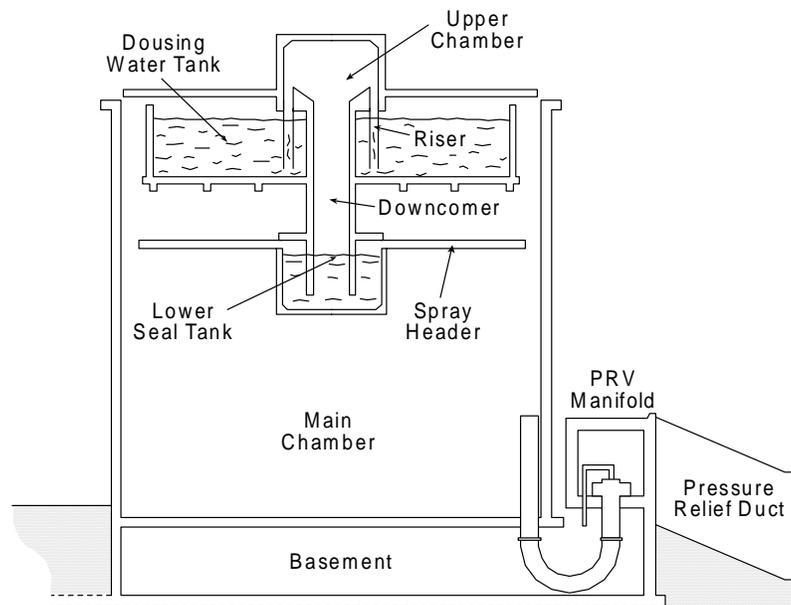
les gaz et la vapeur interrompent l'écoulement. Quand tout le diamètre est rempli, l'effet de siphon cesse.

Dans les gros siphons industriels, qui fonctionnent en continu, on installe des pompes à vide au sommet afin d'éliminer les gaz qui pourraient interrompre ou limiter l'effet de siphon.

Les siphons trouvent deux grandes applications dans les centrales nucléaires. Dans un circuit d'eau de circulation du condenseur (CCW), l'eau froide s'écoule vers le haut dans le condenseur, et à partir du réservoir de sortie elle s'écoule dans la conduite de rejet, puis dans le lac. Bien que le siphon ne fasse pas tout le travail de pompage, il réduit néanmoins de manière appréciable la charge électrique de la pompe CCW, et donc les coûts d'exploitation. Les pompes CCW doivent fournir uniquement suffisamment d'énergie pour vaincre le frottement dans le système. Par ailleurs, le système d'amorçage à vide, relié aux réservoirs d'eau des condenseurs, établit et maintient l'effet de siphon.

Un autre exemple d'utilisation du siphon est le système d'arrosage dans le bâtiment sous vide. La figure 15 illustre le système, dans son état prêt.

Le réservoir d'eau d'arrosage est pourvu de canalisations montantes qui le relie à la chambre supérieure. Les canalisations montantes et la chambre supérieure constituent le segment initial du siphon.



**Figure 15**

La chambre supérieure est le sommet du siphon, et elle est isolée de la chambre principale du bâtiment sous vide. Le vide dans la chambre supérieure doit être maintenu afin d'éliminer les gaz qui proviennent de la solution dans l'eau d'arrosage.

Si un accident de perte du réfrigérant primaire se produit et de grandes quantités de vapeur pénètrent dans le bâtiment de vide, la pression dans la chambre principale augmente. L'eau dans le réservoir d'eau d'arrosage est poussée dans les colonnes montantes et s'écoule vers le réservoir inférieur d'étanchéité. L'eau dans le réservoir isole la chambre supérieure de la chambre principale, et empêche l'air et la vapeur de s'écouler vers le haut, jusqu'au sommet du siphon. L'eau s'écoule ensuite du réservoir inférieur d'étanchéité dans les collecteurs de pulvérisation. Le trop-plein et le réservoir inférieur d'étanchéité constituent le segment final (c.-à-d. le plus long) du siphon.

## 6.2 Boucle d'étanchéité

Les boucles d'étanchéité sont essentiellement des tuyaux en forme de U, dont la partie recourbée est au bas, un peu comme un siphon inversé. Le bas est rempli de liquide pour empêcher les gaz de pénétrer dans le système auquel la boucle d'étanchéité est connectée.

On les utilise habituellement dans les systèmes de purge et d'égout afin d'empêcher que des gaz nocifs ne pénètrent dans l'environnement.

Un exemple dans une centrale nucléaire est illustré à la figure 15, dans le bâtiment sous vide. Le réservoir inférieur d'étanchéité agit comme boucle d'étanchéité, et empêche l'air et la vapeur de pénétrer dans la chambre supérieure, à partir de la chambre principale.

## 6.3 Flottabilité

La force résultante exercée sur un corps par un fluide statique dans lequel il est immergé ou flotte s'appelle flottabilité.

La flottabilité est régie par le principe d'Archimède, selon lequel un corps, flottant ou immergé dans un fluide, est soumis à une force de flottaison égale au poids du liquide déplacé. Cette force agit toujours vers le haut, à la verticale.

Si le corps est plus lourd que le volume de fluide déplacé, il coulera. S'il est égal, il flottera dans le fluide et s'il est plus léger, il montera à la surface. Un corps n'est pas seulement un objet solide, il peut aussi s'agir de bulles de gaz, voire de poches du même fluide qui sont plus légères ou plus lourdes que le reste du fluide à cause d'une différence de température entre ces poches et le fluide environnant, ou encore à cause d'un changement d'état (ébullition ou condensation).

Dans les centrales, on utilise le principe de flottabilité dans de nombreux systèmes pour amorcer et/ou maintenir certains processus importants.

Par exemple, dans les générateurs de vapeur, les bulles de vapeur formées montent à la surface de l'eau à cause de la force de flottaison qui agit sur elles.

Autre exemple : le flux d'eau CCW dans les condenseurs. L'eau accumule la chaleur provenant de la vapeur de condensation et, simultanément, le siphon en

abaisse la pression. Le résultat : les gaz dissous sont libérés et montent au haut des boîtes à eau, de nouveau sous l'effet de la force de flottabilité. Normalement, le système d'amorçage à vide les élimine pour maintenir l'effet de siphon.



## 7 ÉCOULEMENT BIPHASÉ

Par écoulement biphasé, on entend l'écoulement de deux phases d'un fluide, soit la phase liquide et la phase gaz/vapeur.

Il peut y avoir écoulement biphasé dans diverses conditions, à savoir :

- la vapeur est produite à partir d'un liquide, par l'ajout de chaleur ou quand on l'expose à des pressions inférieures à sa pression de vapeur;
- le liquide peut être produit par condensation de la vapeur, par refroidissement et/ou augmentation de la pression au-dessus de la pression de vapeur;
- les gaz dissous dans un liquide peuvent sortir de la solution dans certaines conditions de température/pression;
- les bulles de gaz peuvent être entraînées dans un liquide, à cause de la turbulence ou d'un tourbillon dans un réservoir d'aspiration, ou d'une fuite importante dans un système fonctionnant à une pression subatmosphérique.

Un autre point important dont il faut tenir compte est la taille et la forme des phases gaz/vapeur et liquide, car cela influe sur le rendement hydraulique et thermique de leur mélange, et peut créer divers problèmes opérationnels. Par exemple, de petites bulles de vapeur dans un liquide peuvent causer la cavitation, tandis que les poches de grandes dimensions peuvent provoquer un coup de bélier. Nous expliquons ces deux problèmes plus loin dans ce module. Voici quelques exemples des formes différentes que peut prendre un écoulement biphasé :

- des petites bulles de gaz/vapeur dans un liquide en écoulement;
- de grandes poches de gaz/vapeur qui peuvent même séparer l'écoulement du liquide;
- une pellicule de vapeur séparant le liquide d'une surface chaude, et transférant la chaleur au fluide;
- de petites gouttes liquides (comme un brouillard) ou de grandes masses de liquide dans un écoulement de gaz ou de vapeur;
- un flux stratifié, avec le liquide au bas et la vapeur ou le gaz au-dessus.

Voici quelques exemples que nous retrouvons dans les centrales :

Les bulles de vapeur sont produites pendant le phénomène de cavitation dans les systèmes à eau légère et à eau lourde. Nous traiterons de la cavitation en détail à

la section suivante. Un autre exemple est l'ébullition dans les générateurs de vapeur.

De petites bulles de gaz sont produites pendant l'écoulement de l'eau CCW dans les condenseurs. Pendant ce processus, la solubilité des gaz dans l'eau diminue, parce que la pression de l'eau baisse et la température augmente. Des bulles d'air peuvent également se former à cause de la pénétration d'air dans la partie d'un circuit d'eau qui est à une pression subatmosphérique, par exemple la tuyauterie d'aspiration des pompes d'extraction du condensat.

La présence de poches de vapeur dans un système de liquide ou de masses de liquide dans un système de vapeur/gaz découle de problèmes d'exploitation graves. Nous en traitons plus loin dans ce module, à la section sur les coups de bélier dus à la vapeur et à l'eau.

Une fine pellicule de vapeur peut se former dans des conditions anormales d'exploitation, à la surface de certains éléments combustibles dans le réacteur. Cette situation dangereuse est décrite dans le cours de thermodynamique.

De petites gouttelettes d'eau (brouillard) sont présentes dans la vapeur mouillée, dans les turbines à vapeur et divers systèmes à vapeur. Ce brouillard peut causer plusieurs problèmes d'exploitation, comme l'érosion.

L'écoulement est stratifié également dans les conduites de purge d'huile provenant des roulements des génératrices à turbine. Ces conduites sont surdimensionnées afin d'empêcher que les roulements ne soient noyés. L'huile s'écoule au bas, et l'air contenant de la vapeur d'huile au-dessus. Un flux stratifié peut également se manifester dans les tuyauteries de vapeur/gaz mal purgées, quand la vitesse de la vapeur ou du gaz est trop faible pour rompre le condensat en masses ou en gouttelettes.

Certaines formes d'écoulement biphasé (p. ex., la vapeur humide) sont tolérées, mais d'autres peuvent provoquer des accidents ou accélérer l'usure de l'équipement.

## **7.1 Cavitation**

La cavitation désigne la formation de bulles de vapeur dans les parties basse pression d'un système et l'effondrement subséquent de ces bulles quand elles atteignent les parties haute pression.

La pression doit baisser sous la pression de vapeur qui correspond à la température du liquide pour que l'ébullition commence, et elle doit ensuite augmenter au-dessus de la pression de vapeur pour provoquer l'effondrement des bulles.

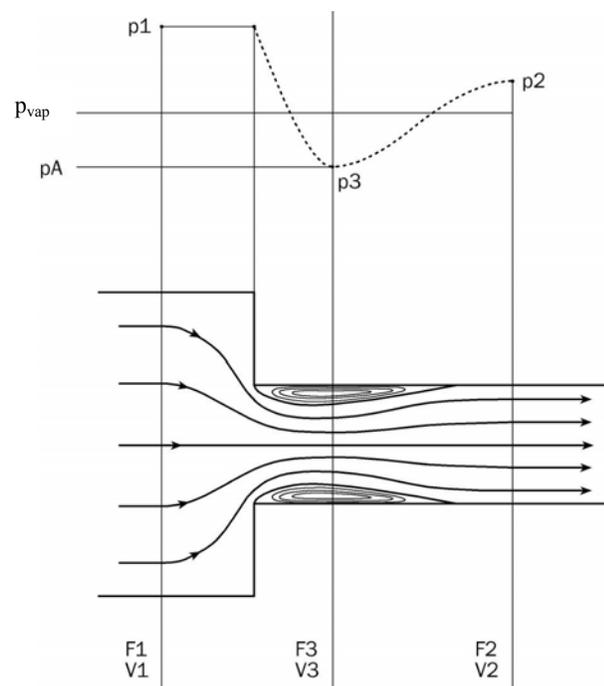
Quand les bulles s'effondrent, les vitesses d'implosion et des pressions très élevées sont générées. Ce phénomène a des conséquences importantes et nombreuses qui peuvent se manifester sous forme de :

- vibrations, avec toutes leurs conséquences, p. ex., fatigue du matériel;
- piqûres dues au martèlement répété;
- bruit.

Les endroits les plus critiques où peut se produire la cavitation dans un circuit d'eau sont les réductions et les élargissements soudains de la section transversale, et les changements d'écoulement du flux.

La figure 16 illustre une réduction soudaine de la section transversale d'une conduite. On y montre la distribution de pression dans une buse où  $p_1$  est la pression du fluide en amont,  $p_2$  la pression en aval et  $p_{vap}$  la pression de vapeur du fluide.

Les bulles de vapeur se produiront dans la région du tuyau où la pression est inférieure à la pression de saturation. Les bulles s'effondreront plus loin dans le tuyau où la pression augmente au-dessus de la pression de saturation.



**Figure 16**

La cavitation ne cause pas nécessairement des dommages, même si elle produit du bruit et des vibrations d'intensité moyenne. Les dommages dépendent de l'importance de la cavitation (c.-à-d. le nombre et la taille des bulles formées) et de l'endroit où elles s'effondrent. Quand la cavitation est prononcée, c'est que de nombreuses bulles s'effondrent à la surface, ou près de celle-ci. Ce phénomène accélère les piqûres et produit des vibrations élevées. Dans les cas extrêmes, la vibration peut détruire très rapidement une tuyauterie (en quelques minutes ou quelques heures).

Voici quelques exemples d'endroits où peut se manifester la cavitation :

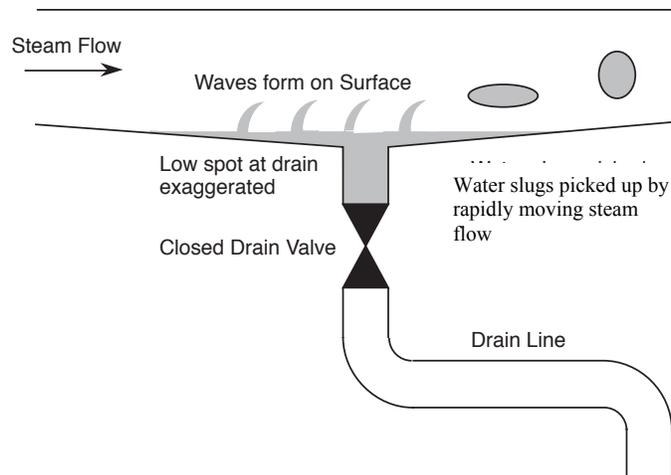
- les conduites d'aspiration des pompes;
- les aubes de pompes centrifuges;
- les coudes et les tés prononcés;
- la partie aval des soupapes partiellement ouvertes;
- les changements soudains de la superficie d'écoulement, p. ex. dans les orifices.

La plupart des endroits où peut survenir la cavitation font partie intégrante du système, et le personnel de la centrale ne peut rien pour atténuer ce phénomène. Toutefois, certaines pratiques d'exploitation peuvent provoquer la cavitation. Par exemple, si on exploite le système avec un étranglement accru à basse pression et à des températures élevées, cela peut faire diminuer la pression de vapeur du liquide dans le système. Nous expliquons plus en détail ce phénomène dans le prochain module.

## **7.2 Coup de bélier**

Le coup de bélier est un phénomène potentiellement dangereux et dommageable, car il s'accompagne de chocs à une pression extrêmement élevée. Ce phénomène survient habituellement dans les situations suivantes :

- une décélération soudaine (dans le cas extrême, arrêt) d'une colonne de fluide;
- l'impact de masses d'eau transportées par de la vapeur ou du gaz (figure 17) quand elles frappent des obstacles comme des coudes, des soupapes, des collecteurs et des réservoirs (on parle alors souvent d'impact d'eau).



**Figure 17**

Dans le premier cas, des forces importantes doivent être exercées sur le fluide pour le décélérer rapidement, comme l'exige la deuxième loi de la dynamique. Ces forces produisent des vagues à haute pression (chocs) qui se propagent dans le fluide dans toutes les directions. Ce processus est décrit ci-dessous.

Quand un fluide en déplacement rencontre un obstacle, l'énergie cinétique est transformée en énergie de pression. En raison de l'élasticité du système, une partie seulement de l'énergie est dissipée dans le premier choc par le frottement et les vibrations.

Le reste est stocké temporairement sous forme d'énergie de pression dans le fluide (qui agit alors comme un ressort comprimé). Cette énergie est ensuite reconvertie en énergie cinétique quand le fluide se déplace en direction opposée jusqu'à ce qu'il rencontre un nouvel obstacle. Une autre vague de pression est alors générée, ce qui produit un autre coup, bien que plus faible, car une partie de l'énergie est dissipée. Ce phénomène d'aller et de retour peut se produire plusieurs fois jusqu'à ce que toute l'énergie cinétique du fluide soit dissipée.

Bien que le « coup de bélier » soit également appelé « marteau d'eau », ce qui laisse supposer que ce phénomène ne se produit qu'avec l'eau, il peut se produire tout aussi violemment avec n'importe quel fluide. Toutefois, en raison de la masse volumique plus grande des liquides, le coup de bélier est plus dangereux dans les circuits de liquide, notamment si le liquide a une grande énergie cinétique en raison de sa masse et de sa vitesse.

Les coups de bélier peuvent provoquer des dommages graves. Dans les cas extrêmes, un coup de bélier peut même briser l'équipement dans lequel il se produit. Si le système contient de l'eau ou de la vapeur chaude sous pression, un coup de bélier peut même présenter un danger pour la vie des personnes à proximité. Dans les cas les moins graves, le mouvement violent de la tuyauterie causé par les chocs peut endommager les supports et les colliers de suspension de tuyaux, rompre les poussoirs ou les conduites d'alimentation en fluide, ou encore endommager de manière irréparable l'isolant de la tuyauterie.

Même s'il n'y a pas de dommage, être témoin d'un coup de bélier quand on est près d'une tuyauterie peut être une expérience impressionnante. Les bruits assourdissants qui l'accompagnent et les soubresauts violents dans le système donnent un aperçu très vif des forces en cause.

Il y a eu de nombreux incidents de coups de bélier dans les centrales. Dans un cas, un collecteur de vapeur n'était pas correctement purgé et l'afflux de vapeur a ramassé d'importantes masses d'eau et les a charriées dans la tuyauterie. Certaines soupapes ont été déplacées de 0,20 m et toute la tuyauterie a violemment été secouée.

Outre les pratiques d'exploitation appropriées (ce dont nous traiterons dans les sections suivantes), certaines méthodes de conception aideront à prévenir, du moins à atténuer, les coups de bélier :

- un orifice placé dans le système dissipera l'excès d'énergie cinétique. Toutefois, cet orifice est présent dans le système tout le temps et introduit donc une perte de hauteur de pression.
- Un antibélier dans un réservoir, pourvu d'un coussin de gaz interne qui absorbe une partie des pointes de pression réduit donc le coup de bélier. Cette solution est toutefois limitée aux petits systèmes.
- Les tuyaux verticaux (Figure 18) ou les chambres d'équilibrage sont utilisés dans les systèmes basse pression, sinon ils devraient être extrêmement hauts ou être placés bien au-dessus du système. Ces tuyaux ou réservoirs peuvent compenser les changements rapides de pression. L'augmentation de pression sera limitée à la hauteur du tuyau vertical ou du réservoir.

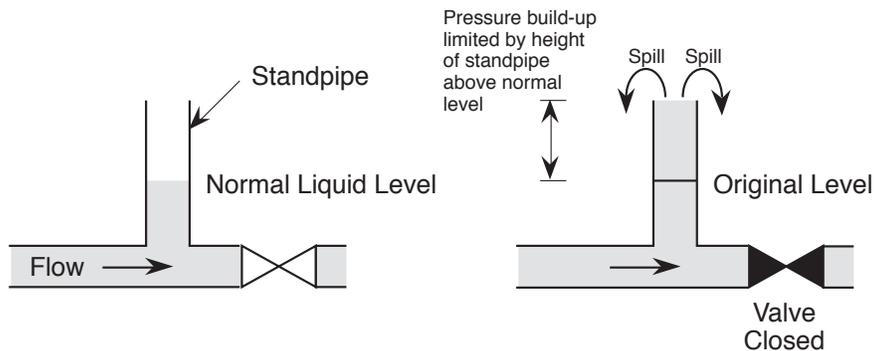


Figure 18

### 7.3 Coup de bélier induit par la vapeur

Le coup de bélier induit par la vapeur est attribuable à l'effondrement de poches de vapeur, ce qui produit de l'eau qui s'écoule pour remplir les vides ainsi que les points. Cet effondrement provoque des vagues de pression qui peuvent endommager l'équipement.

Les coups de bélier dus à la vapeur sont également appelés coups de bélier induits par condensation.

Les coups de bélier par vapeur se produisent habituellement dans les canalisations dans lesquelles s'écoulent des quantités importantes de liquides pressurisés près de la température de saturation. Ce serait le cas, par exemple, des purgeurs dans les canalisations de vapeur.

Quand un purgeur est ouvert, la pression près de celui-ci diminue. Quand la pression baisse sous la pression de saturation, des poches de vapeur se forment au niveau du purgeur. Le liquide derrière la poche de vapeur commence à se déplacer vers le purgeur, en raison de la différence de pression provoquée par son ouverture. La pression près du purgeur se reformera rapidement et provoquera un effondrement violent de la poche de vapeur. Les collisions résultantes du liquide qui s'écoule rapidement pour remplir les vides envoient des vagues de pression dans tout le système. Ces vagues provoquent au passage l'effondrement des autres poches de vapeur. Quand une vague passe, une autre poche de vapeur se forme. Ce cycle de formation et d'effondrement des poches se poursuit à mesure que les vagues haute et basse pression vont et viennent à la vitesse du son dans le fluide. En supposant qu'il n'y a pas de dommage au système, les vagues se propagent dans tout le système jusqu'à ce que le frottement dissipe leur énergie.

Des coups de bélier importants dus à la vapeur peuvent également se produire dans un système CCW, quand la pompe CCW se déclenche et si les dispositifs antirefoulement sont défectueux (ces dispositifs admettent une quantité régulée d'air qui agit comme coussin). Au déclenchement de la pompe CCW, le débit d'eau diminue. Comme les condenseurs sont situés au-dessus des pompes, le flux ascendant (c.-à-d. qui se déplace contre la gravité) ralentit plus rapidement que le flux descendant, dans la canalisation d'évacuation.

Ce phénomène peut provoquer la formation de poches de vapeur à très basse pression, quand les flux d'eau se séparent. En raison de la faible température de l'eau dans le système CCW (10-20°C), la pression de vapeur correspondante est d'environ 1-2 kPa(a). Le vide prononcé des poches de vapeur ramènera l'eau pour en provoquer l'effondrement (et ce qui provoquera un coup de bélier dû à la condensation).

Des incidents graves provoqués par des coups de bélier dus à la vapeur sont survenus dans les centrales. Dans un cas, une chute de pression importante et rapide dans le dégazeur a provoqué un flash violent de l'eau dans le réservoir du dégazeur. Ce flash a provoqué un contre-refoulement de l'eau. Quand la masse d'eau en déplacement a frappé la paroi d'extrémité du réservoir, celui-ci s'est déplacé de 0,15 m, cisillant les boulons qui le retenaient sur son socle. Il est évident que des forces très importantes peuvent être provoquées par un coup de bélier dû à la condensation.

#### 7.4 Réduction des coups de bélier (eau ou vapeur)

Plusieurs bonnes pratiques d'exploitation permettent de réduire au minimum les risques de coups de bélier dus à la vapeur ou à l'eau :

- purge des systèmes de vapeur ou de gaz;
- aération et amorçage lent des systèmes de liquide;
- fonctionnement lent des soupapes et des robinets;
- démarrage et arrêt des pompes centrifuges avec leur soupape de refoulement fermée ou à peine entrouverte;
- délai entre les démarrages et les arrêts des pompes;
- application d'eau de refroidissement sur l'échangeur de chaleur en premier.

Discutons maintenant de ces différents points l'un après l'autre, afin de voir comment on peut réduire les coups de bélier, qu'ils soient produits par la vapeur ou par l'eau.

Si on purge le liquide contenu dans un système de vapeur ou de gaz, on prévient l'accumulation du liquide. Toutefois, si on ne purge pas correctement le système, il est probable qu'il y aura formation de masses d'eau. Ces masses seront ramassées et charriées par la vapeur ou le gaz, ce qui produira un coup de bélier ou un impact. Dans les systèmes à vapeur, la vitesse de réchauffement devrait être suffisamment faible pour ne pas induire de contraintes thermiques, mais également afin d'empêcher la surcharge des purgeurs.

De plus, en réduisant la quantité de condensat, la purge appropriée d'un système de vapeur réduit le risque des coups de bélier par condensation quand on ouvre les purgeurs.

Par ailleurs, l'aération et l'amorçage lent des systèmes de liquide empêchera les coups de bélier. Si on amorce trop rapidement le système, le liquide entrant aura une énergie cinétique élevée et tout obstacle que l'eau rencontrera –coudes, soupapes, robinets, collecteurs – subira un fort impact.

L'aération est également importante. S'il n'y a pas suffisamment d'aération, le gaz ou la vapeur emprisonné dans le système pourrait bloquer temporairement l'écoulement du liquide, ce qui peut provoquer des pulsations de pression. Ces pulsations peuvent à leur tour provoquer un coup de bélier dû à l'eau ou à la condensation, si la vapeur est près de sa pression de saturation.

Par ailleurs, le fonctionnement lent des robinets et des soupapes permet à l'énergie cinétique du liquide de se transformer graduellement en énergie de pression et de se dissiper par frottement pendant la fermeture, tandis que l'ouverture lente fait augmenter progressivement l'énergie cinétique. Les robinets qui nécessitent plusieurs tours de poignée ou de manette pour s'ouvrir ou se fermer (comme les robinets-vannes et les robinets à soupape) ne peuvent pas

provoquer de coups de bélier. Toutefois, les robinets à papillon, à tournant sphérique ou à tournant conique qui peuvent être ouvertes ou fermées très rapidement – c'est-à-dire en un seul quart de tour à partir de la position entièrement ouverte ou entièrement fermée – doivent être utilisées avec prudence.

Le démarrage ou l'arrêt d'une pompe centrifuge dont la soupape de refoulement est fermée ou à peine entrouverte empêche les coups de bélier, car l'écoulement dans le système variera progressivement.

Par ailleurs, en déphasant les démarrages et les arrêts des pompes dans un système qui en comporte plusieurs, on prévient les coups de bélier. Ce déphasage (ou délai) donnera au système le temps de dissiper l'énergie des vagues de pression provoquées par le démarrage ou l'arrêt de la pompe précédente.

Enfin, la dernière bonne pratique que nous voulons mentionner est l'application d'eau de refroidissement aux échangeurs de chaleur en premier. Dans ce cas-ci, nous voulons prévenir le problème de coups de bélier dus à la condensation. En effet, si, pendant le démarrage, l'écoulement de l'eau de refroidissement n'est pas établi avant l'admission de la vapeur ou de l'eau chaude à une température supérieure à la température de saturation de l'eau de refroidissement, il y a le risque que des poches de vapeur se forment dans le liquide de refroidissement. Quand le circuit de refroidissement est établi par la suite, la pression augmente et les poches de vapeur peuvent se condenser abruptement. Cela produira une collision violente des colonnes d'eau qui avaient été séparées antérieurement par les poches de vapeur. De la même façon, quand on arrête un échangeur de chaleur, on devrait d'abord fermer la canalisation de vapeur ou du liquide le plus chaud avant de fermer le circuit de refroidissement.

## **7.5 Fonctionnement en phase liquide seulement**

Comme l'indique son nom, le fonctionnement en phase liquide seulement désigne le système qui est entièrement rempli de liquide. Le système ne comporte aucun vide, ni réservoir avec coussin de gaz ou vapeur. C'est le mode usuel d'exploitation de nombreux circuits de liquide dans les centrales. Mentionnons quelques exemples : le système de transport de chaleur, sans organe de pressurisation ou dans lequel le dispositif de pressurisation est isolé, ainsi que le système d'eau de refroidissement remise en circulation (deminéralisée). Tout changement de température provoquera la dilatation et la contraction du liquide dans le système qui sera différent de la dilatation/contraction de la tuyauterie. Cette différence des coefficients de dilatation/contraction doit être prise en compte. Si la température du système augmente, il faudra purger une partie du liquide pour éviter l'accumulation de pression. Si la température diminue, il faudra plutôt fournir du liquide au système pour éviter le flashing d'une partie du liquide du système en vapeur, ce qui pourrait provoquer des coups de bélier par condensation lorsque la pression du système augmentera subséquentement. Ces étapes de purge et d'appoint sont particulièrement critiques pendant les phases de démarrage et d'arrêt, quand les changements de température peuvent être importants.

Les grandes pointes de pression dans l'exploitation en mode liquide uniquement peuvent être provoquées soit par des changements rapides de température, ou par des changements rapides de la vitesse d'écoulement (p. ex., dans le cas d'un coup de bélier). Les pointes de pression dues aux variations de la vitesse d'écoulement sont particulièrement dangereuses et ne sont pas limitées au seul mode d'exploitation en phase liquide seulement. Les pointes de pression causées par les variations de la vitesse d'écoulement sont beaucoup plus rapides que celles qui sont dues aux changements de température. Dans les deux sections précédentes, nous avons traité des coups de bélier dus à l'eau et à la vapeur, et nous traiterons plus à fond des pointes de pression dans les modules sur les pompes, les robinets et les soupapes. Dans les procédures d'exploitation des centrales, on tient compte des signes avant-coureurs des pointes de pression importantes, c'est-à-dire les variations de la température et de la vitesse d'écoulement du fluide. Des mesures préventives ont été intégrées aux procédures.

## 8 VIBRATIONS INDUITES PAR L'ÉCOULEMENT

Nous avons traité des vibrations dans le module précédent. Toutefois, nous n'avons pas encore parlé des vibrations provoquées par l'écoulement même des fluides.

Les vibrations induites par les fluides peuvent être causées par diverses conditions dans un système, p. ex. :

- turbulence élevée;
- cavitation;
- pulsation de la pression;
- répercussions des coups de bélier dus à la vapeur ou à l'eau.

Nous avons déjà traité dans ce module de la cavitation et des coups de bélier (eau et vapeur).

Une turbulence prononcée peut également induire des vibrations. En effet, une caractéristique inhérente d'un écoulement turbulent est la pulsation aléatoire de la pression. Ce processus produit un large spectre de fréquences, qui a pour effet d'accroître la vitesse du fluide. La formation et l'évanouissement des tourbillons ici et là dans le fluide ont pour effet de modifier abruptement la direction de l'écoulement, ce qui accroît les pulsations de la pression. Parmi les équipements qui provoquent ce phénomène, mentionnons les soupapes, les coudes, les orifices et la tubulure des échangeurs de chaleur. Le large spectre de fréquences causées par un écoulement turbulent augmente le risque de résonance.

Un surcroît de pulsations de pression est dû au fonctionnement de l'équipement de traitement des fluides comme les pompes, les turbines, les compresseurs et les ventilateurs. Dans ces machines, les pales et les aubes font tourbillonner le fluide. Par exemple, dans les pompes centrifuges, la pression en aval de chaque aubage de la roue est un peu plus faible qu'au milieu de chaque passage entre les aubes. Quand la roue tourne, la pression du liquide fourni par la pompe pulse à la fréquence à laquelle les aubes rencontrent la sortie de la pompe. Cette fréquence dépend donc du nombre d'aubes sur la roue et de leur vitesse de rotation (en tours/minute).

Dans le module sur les vibrations, nous avons traité la résonance et nous avons déterminé qu'elle se produit quand une fréquence forcée est égale à l'une des fréquences naturelles de l'objet.

Un objet peut être n'importe quel élément ou composant d'un système de fluide, p. ex. une section de tuyauterie, une pompe, un faisceau de tubulure dans un échangeur de chaleur, voire le fluide lui-même. Si l'une des fréquences naturelles de cet objet est près d'une fréquence de vibration induite par l'écoulement, il peut

se produire un phénomène de résonance qui accroîtra les vibrations jusqu'à un niveau dangereux.



## 9 RÉSUMÉ

Ceci termine notre tour d'horizon des principes de base de la mécanique de fluide. Vous devriez maintenant avoir une bonne connaissance des propriétés de base des fluides, à savoir la pression, la masse volumique, la viscosité, les débits massique et volumétrique, les diverses charges (hauteur d'élévation, hauteur de pression, charge dynamique), les pertes de chaleur et leurs influences mutuelles. Vous avez également appris les processus de base qui influent sur l'écoulement des fluides dans des composants simples que l'on retrouve dans les centrales comme les coudes, les orifices, les venturis, les soupapes, les robinets, les pompes. Vous comprenez et pouvez reconnaître certains problèmes d'exploitation associés à la mécanique des fluides, comme les vibrations induites par l'écoulement, la cavitation et les coups de bélier (eau et vapeur). Enfin, nous avons brièvement présenté quelques bonnes pratiques d'exploitation qui permettent d'éviter ces problèmes. En guise de conclusion, ce module vous a donné une bonne base pour étudier plus en détail certains des composants les plus communs dans les centrales CANDU. C'est l'objet des modules suivants.



## 10 QUESTIONS POUR LE TRAVAIL PRATIQUE

1. Définissez les termes suivants et indiquez les unités de mesure correspondantes :
  - a) pression;
  - b) masse volumique;
  - c) viscosité.
2. Convertissez les valeurs suivantes de pression selon les différentes échelles de pression :
  - a) 5,0 kPa(a), dans les échelles vacuométrique et manométrique;
  - b) 170,0 kPa(g) dans l'échelle absolue;
  - c) 40,0 kPa(v) dans les échelles absolue et manométrique.
3. Une soupape de sûreté hydraulique a un piston d'une superficie de  $0,004 \text{ m}^2$ . Le piston est muni d'un ressort qui le retient en position fermée pendant le fonctionnement normal du système. Ce ressort exerce une force contre la partie aval du piston, sur une superficie de  $0,020 \text{ m}^2$ . La soupape de sûreté est conçue pour se lever si la pression du fluide hydraulique dépasse 15 MPa. Calculez la force du ressort nécessaire pour garder la soupape de sûreté tout juste fermée à cette pression.
4. Indiquez les facteurs qui influent sur la pression statique exercée à la base d'une colonne de liquide.
5. Indiquez les facteurs qui influent sur la pression d'un gaz dans un contenant.
6. Décrivez la différence entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent, en ce qui concerne :
  - a) le profil de vitesse de l'écoulement,
  - b) les pulsations des vitesses et de pression.
7. Définissez le débit massique, et indiquez quelle est son unité de mesure.
8. Définissez le débit volumétrique, et indiquez son unité de mesure.
9. Indiquez la relation entre les débits massique et volumétrique.
10. Énoncez le principe de continuité, et son application au débit massique.
11. L'eau s'écoule dans un circuit sans fuite, dans un tuyau d'une section transversale de  $100 \text{ cm}^2$ , à une vitesse de 4 m/s. Cette eau s'écoule hors du circuit pour arriver dans un tuyau d'une section transversale de  $200 \text{ cm}^2$ .

En utilisant le principe de continuité, déterminez la vitesse de l'eau à sa sortie du circuit.

12. Expliquez l'effet de la pression et de la température sur le débit volumétrique pour :
  - a) les liquides;
  - b) les gaz.
13. Définissez les termes suivants, pour un circuit dans lequel s'écoule un liquide :
  - a) hauteur d'élévation, hauteur de pression et charge dynamique;
  - b) pression statique, pression dynamique et pression totale;
  - c) perte d'énergie et perte de charge.
14. Énoncez l'effet de la viscosité et de la vitesse d'un fluide sur la perte de charge dans un écoulement turbulent.
15. Énoncez l'effet de la température sur la viscosité des liquides.
16. Expliquez la relation entre la hauteur d'élévation, la hauteur de pression et la charge dynamique dans un système de fluide où il y a des pertes et des ajouts d'énergie.
17. Expliquez ce qui arrive à la pression et à la vitesse d'un fluide dans chacun des systèmes suivants :
  - a) un tuyau horizontal droit de diamètre constant;
  - b) un tuyau horizontal droit pourvu d'un réducteur et d'un venturi;
  - c) une pompe centrifuge avec un tuyau d'aspiration droit et un tuyau de refoulement contenant un clapet antiretour à étranglement;
  - d) un tuyau de diamètre constant avec tube vertical, une soupape, un orifice et deux coudes à 90 degrés.
18. Définissez et décrivez les termes suivants :
  - a) siphon;
  - b) boucle d'étanchéité;
  - c) flottabilité.
19. Expliquez les effets négatifs de l'accumulation de gaz ou de vapeur dans un siphon.
20. Définissez ce qu'on entend par écoulement biphasé.

21. Décrivez les cinq formes courantes d'écoulement biphasé et, pour chacun d'entre eux, donnez un exemple dans une centrale CANDU.
22. Définissez ce qu'on entend par cavitation et expliquez comment elle se produit dans un système de fluide.
23. Indiquez trois endroits potentiels de cavitation dans une centrale CANDU.
24. Définissez chacune des expressions suivantes, et expliquez pourquoi chaque phénomène produit une importante pointe de pression dans un système de fluide :
  - a) coup de bélier;
  - b) coup de bélier par condensation;
  - c) fonctionnement en phase liquide uniquement.
25. Expliquez comment chacune des pratiques suivantes réduit le risque de coup de bélier (dû à l'eau ou à la vapeur) :
  - a) purge des systèmes de vapeur ou de gaz;
  - b) aération et amorçage lent des systèmes de liquide;
  - c) fonctionnement lent des soupapes et des robinets;
  - d) démarrage et arrêt des pompes centrifuges avec leur soupape de refoulement fermée ou à peine entrouverte;
  - e) délai entre les démarrages et les arrêts des pompes;
  - f) application d'eau de refroidissement sur l'échangeur de chaleur en premier.
26. Expliquez comment un fluide en écoulement peut induire des vibrations dans l'équipement, à cause de :
  - a) la turbulence élevée;
  - b) le passage de l'eau autour des aubes ou des pales, p. ex. dans une turbine à gaz ou une pompe centrifuge.

Figures – Texte 03-523-f

Figure 1

Absolute Pressure	=	Pression absolue
Positive Gage Pressure	=	Pression manométrique positive
Negative Gage Pressure (vacuum)	=	Pression manométrique négative (vide)
Differential Pressure	=	Pression différentielle
Pressure A	=	Pression A
Pressure B	=	Pression B
Ambiant pressure (zero gage pressure)	=	Pression ambiante (pression manométrique zéro)
Zero absolute pressure	=	Pression absolue zéro

Figure 2

Gas pressure	=	Pression du gaz
$P_{\text{gas}}$	=	$p_{\text{gaz}}$
Liquid density	=	Masse volumique du liquide

Figure 3

(a) Laminar Flow	=	(a) Écoulement laminaire
(b) Turbulent Flow	=	(b) Écoulement turbulent

Figure 4

Area (A)	=	Superficie (A)
----------	---	----------------

Figure 7

Floor (datum)	=	Plancher (point de référence)
---------------	---	-------------------------------

Figure 9

Ideal Energy Grade Line (no friction)	=	Ligne d'énergie idéale (sans frottement)
Energy Loss	=	Perte d'énergie
Actual Energy Grade Line	=	Ligne d'énergie réelle
Actual Pressure Grade Line	=	Ligne de pression réelle
Slope = Energy Losses / Length	=	Pente = Pertes d'énergie / Longueur
Datum Line	=	Ligne de référence

Figure 10

Energy Grade Line	=	Ligne d'énergie
Pressure Grade Line	=	Ligne de pression
Datum Line	=	Ligne de référence
Nozzle	=	Buse
Venturi	=	Venturi

Figure 11

Energy Grade Line	=	Ligne d'énergie
Pressure Grade Line	=	Ligne de pression
Datum Line	=	Ligne de référence

Figure 12

Energy Grade Line	=	Ligne d'énergie
Pressure Grade Line	=	Ligne de pression
Datum Line	=	Ligne de référence

Figure 13

Energy Grade Line	=	Ligne d'énergie
Pressure Grade Line	=	Ligne de pression
Datum Line	=	Ligne de référence

Figure 15

Dousing Water Tank	=	Réservoir d'arrosage
Upper Chamber	=	Chambre supérieure
Riser	=	Colonne montante
Downcomer	=	Trop-plein
Lower Seal Tank	=	Réservoir inférieur d'étanchéité
Spray Header	=	Collecteur de vaporisation
Main Chamber	=	Chambre principale
Basement	=	Sous-sol
PRV Manifold	=	Collecteur du détendeur
Pressure Relief Duct	=	Conduite de sûreté

Figure 17

Steam Flow	=	Écoulement de la vapeur
Waves form on surface	=	Vagues se formant à la surface
Low spot at drain exaggerated	=	L'accumulation d'eau au niveau du drain est exagérée
Water slugs picked up by rapidly moving steam flow	=	Masses d'eau ramassées par la vapeur en écoulement rapide
Closed Drain Valve	=	Robinet de purge fermé
Drain Line	=	Conduite de purge

Figure 18

Standpipe	=	Tuyau vertical
Normal Liquid Level	=	Niveau normal des liquides
Flow	=	Écoulement
Pressure build-up limited by height of standpipe above normal level	=	L'accumulation de pression est limitée par la hauteur du tuyau vertical au-dessus du niveau normal
Spill	=	Déversement
Original Level	=	Niveau original
Valve Closed	=	Soupape fermée