



Guide sur la Vapeur

Tome 1 : Principes physiques de la vapeur



Sommaire

Chapitre 1 - Introduction	3
Chapitre 2 - Energie, température et pression	4
2.1 Energie thermique	4
2.2 Température	4
2.2.1 L'échelle Celsius (ou Centigrade)	4
2.2.2 L'échelle absolue ou °K (Kelvin)	4
2.2.3 Point triple	5
2.2.4 Point critique (CP)	5
2.3 Pression	5
2.3.1 Pression absolue (bar abs)	5
2.3.2 Pression effective (bar eff.)	5
2.3.3 Vide ou pression négative	5
2.3.4 Pression différentielle	5
Chapitre 3 - Qu'est-ce que la vapeur ?	6
3.1 Formation de vapeur à la pression atmosphérique	6
3.2 Enthalpie liquide ou enthalpie de l'eau ou chaleur sensible (symbole h_f)	7
3.3 Enthalpie d'évaporation, enthalpie de vaporisation, chaleur latente (symbole h_{fg})	7
3.4 Energie totale (symbole h_g)	7
3.4.1 Tableau 1 - Table de la vapeur abrégée	8
3.5 Vapeur à une pression supérieure à la pression atmosphérique	8
3.5.1 Exemple	8
3.6 Relations pression/température de la vapeur d'eau	9
3.7 Relations pression/volume de la vapeur d'eau	10
3.8 Relations pression/enthalpie de la vapeur d'eau	11
3.8.1 Tableau 2 - Table de la vapeur abrégée et enthalpie par volume	11
3.9 Pression de vapeur et transport de chaleur	12
3.9.1 Exemple 1	12
3.9.2 Exemple 2	12
3.10 Pression de vapeur et transfert thermique dans le process	14

Chapitre 4 - Conditions de base de la vapeur 15

4.1	Température et pression correctes.....	15
4.2	Air et gaz incondensables	15
4.2.1	Loi Dalton sur les pressions partielles.....	15
4.2.2	Sources d'air et de gaz incondensables.....	16
4.3	Propreté de la vapeur	17
4.4	Qualité correcte de la vapeur	17
4.4.1	Vapeur humide et titre	17
4.4.2	La vapeur humide et sa conséquence sur le contenu thermique de la vapeur	18

Chapitre 5 - Barrières au transfert thermique 19

5.1	L'air, l'eau et le tartre.....	19
------------	---------------------------------------	-----------

Chapitre 6 - Vapeur surchauffée 21

6.1	Vapeur surchauffée provenant d'une chaudière.....	21
6.2	Vapeur surchauffée provenant d'un appareil de détente	21
6.3	Vapeur saturée plus sèche provenant d'un appareil à pression élevée	23
6.3.1	Exemple	23
6.4	Applications de vapeur surchauffée	24
6.4.1	Exemple	25
6.5	Le diagramme de Mollier (diagramme enthalpie - entropie).....	25
6.5.1	Exemple 1	27
6.5.2	Exemple 2	27

Chapitre 7 - Condensat et vapeur de revaporisation..... 28

7.1	Condensat	28
7.2	Vapeur de revaporisation.....	28
7.2.1	Tableau 3 - Table de la vapeur abrégée.....	28
7.2.2	Exemple	29

Chapitre 8 - Tables de la vapeur..... 30

Chapitre 1

Introduction

La vapeur a été utilisée comme vecteur d'énergie dès les premiers jours de la révolution industrielle. Aujourd'hui, son utilisation est courante dans l'industrie, non seulement pour produire une énergie mécanique (par exemple, actionner des turbines à vapeur pour produire de l'énergie électrique), mais aussi pour le chauffage d'ambiance et les applications de process.

Voici les avantages d'utiliser la vapeur comme fluide industriel :

- Elle est facile à distribuer et à réguler.
- Elle sert à la production d'énergie et/ou au chauffage et/ou au process.

En plus, l'eau et la vapeur ont les qualités inhabituelles suivantes :

- L'eau est au moins le liquide le plus courant sur Terre. Elle est abondante et bon marché.
- Elle est chimiquement stable et sans danger pour la santé.
- L'eau s'évapore en vapeur à des températures bien inférieures aux limites métallurgiques des aciers.
- L'eau et la vapeur peuvent absorber de grandes quantités de chaleur, et l'évaporation de l'eau en vapeur entraîne également une importante absorption de chaleur. Cela signifie que les tailles et les coûts d'une installation sont très intéressants pour la production, la distribution et l'utilisation d'énergie.
- La vapeur fournit de la chaleur à tout process maintenu à une pression constante en se condensant à une température constante avec des coefficients de transfert thermique élevés. Cette température de condensation constante élimine tout gradient de température sur les surfaces de transfert thermique dans l'espace vapeur.

L'utilisation de la vapeur est un moyen idéal pour libérer la quantité exacte d'énergie au point d'utilisation, efficacement et sans besoin de pompes de circulation. Son utilisation dans presque toutes les industries de process et dans les systèmes de chauffage est connue depuis plus de 100 ans, principalement grâce à :

- Sa haute capacité thermique.
- La simplicité de transport de l'énergie thermique le long des tuyauteries de distribution.
- La simplicité de sa régulation.

Les avantages résultants de l'utilisation de la vapeur pour les process et le chauffage ne pourront jamais être fournis par un autre vecteur thermique.

Noter que les débits sont notés par un point sur le symbole, par exemple :

Q = Quantité de chaleur en kJ

$\dot{Q}$ = Quantité de transfert thermique en kJ/s, kJ/h, etc...

m = Masse en kg

$\dot{m}$ = Débit massique en kg/s, kg/h, etc...

V = Volume en m^3

$\dot{V}$ = Débit volumétrique en m^3/s , m^3/h

Chapitre 2

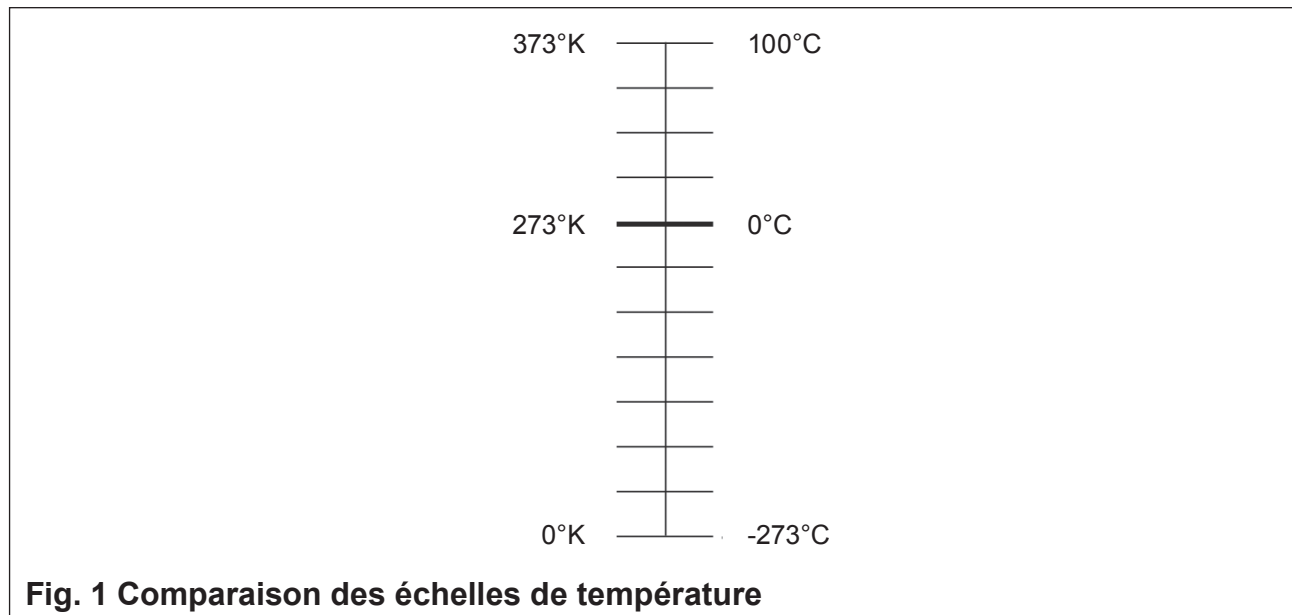
Energie, température et pression

2.1 Energie thermique

Les unités SI utilisées sont le joule (J), défini comme 1 Nm de travail, et le watt (W) défini comme 1 J/s (ou 1 Nm/s). D'autres unités sont toujours utilisées comme le Btu et la Calorie.

2.2 Température

En unités SI, la température se mesure en °C ou °K. Dans les équations thermodynamiques, le °K est l'unité généralement utilisée.



2.2.1 L'échelle Celsius (ou Centigrade)

L'échelle la plus couramment utilisée par les ingénieurs, car elle a une température zéro pratique (mais arbitraire) correspondant à la température à laquelle l'eau gèle à la pression atmosphérique et une température 100 pour le point d'ébullition à cette même pression.

2.2.2 L'échelle Absolue ou °K (Kelvin)

Une échelle similaire avec les mêmes différentiels, mais avec un zéro°K correspondant à la température minimale possible d'une substance lorsque tout mouvement moléculaire et atomique a cessé (environ -273°C).

La température absolue à laquelle l'eau se transforme en glace à la pression atmosphérique est + 273°K, et les deux échelles sont donc interchangeables avec la relation :

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

Par exemple, à la pression atmosphérique, l'eau bout et se transforme en vapeur à 100°C ou 373°K. Comme les deux échelles ont les mêmes différentiels, une différence de température de 1°C est la même que 1°K, donc un changement de température de 10°C est exactement le même qu'un changement de température de 10°K. Ceci est important pour les calculs de transfert thermique lorsque les unités peuvent être exprimées en watt/m²°K ou watt/m²°C. Comme ces équations concernent un transfert thermique relatif aux changements de température, il n'y a pas de différence de résultat. On utilisera l'unité Celsius dans ce document.

2.2.3 Point Triple

Le point triple est une combinaison particulière de température et de pression où la glace, l'eau et la vapeur peuvent théoriquement coexister dans un équilibre thermique.

La température à laquelle il se produit a été acceptée internationalement comme un point fixé suivant l'échelle de température absolue et est par définition 0,01°C à une pression de 0,006 112 bar abs. Les trois états de l'eau coexistent uniquement à cette température et à cette pression. Si de la chaleur est ajoutée à des pressions maintenues en dessous de celle-ci, la glace, au lieu de fondre puis de s'évaporer, se sublime immédiatement en vapeur. Le point triple a un intérêt académique et n'a pas de signification réelle pour la vapeur utilisée à des pressions classiques pour un usage quotidien.

2.2.4 Point critique (CP)

Lorsque la pression de l'eau augmente, la température à laquelle elle bout augmente aussi, définissant ainsi clairement le point d'ébullition. Cela est vrai jusqu'au point critique, qui marque la fin du processus d'ébullition 374,15°C et 221,2 bar abs. L'eau à toute pression plus élevée est considérée 'supercritique', et n'a pas vraiment de point d'ébullition défini. Le point critique est d'un intérêt académique et ne concerne pas la vapeur utilisée à des pressions classiques pour un usage quotidien.

2.3 Pression

Les unités utilisées dans le monde pour exprimer les variations de pression varient suivant les systèmes Impérial et Métrique et leurs dérivés. Les unités sont le lbf/in², le kg/cm², le bar et le pascal. Ce guide utilise le bar ; les facteurs de conversion en d'autres unités sont facilement disponibles.

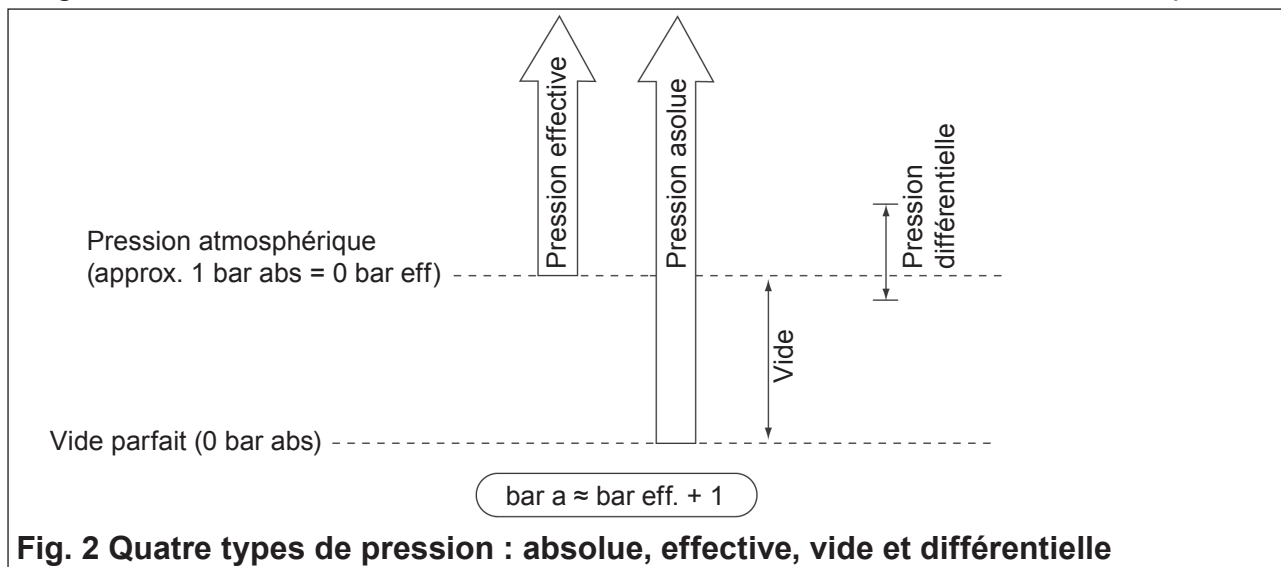


Fig. 2 Quatre types de pression : absolue, effective, vide et différentielle

2.3.1 Pression absolue (bar abs)

C'est la pression d'une vapeur mesurée à partir du vide parfait, c'est à dire 0 bar abs.

2.3.2 Pression effective (bar eff)

C'est la pression d'une vapeur mesurée à partir de l'atmosphère environnante.

Ainsi : Pression effective = Pression absolue - Pression atmosphérique

2.3.3 Vide ou pression négative

La pression de la vapeur inférieure à la pression de l'atmosphère. Une pression de - 1 bar eff correspond au vide parfait.

Un vide écrit '- 0,3 bar' correspond à - 0,3 bar eff ou une pression absolue de 0,7 bar abs.

2.3.4 Pression différentielle

La différence entre deux pressions.

Chapitre 3

Qu'est-ce que la vapeur ?

3.1 Formation de vapeur à la pression atmosphérique

La bouilloire domestique est probablement la forme la plus simple de chaudière produisant de la vapeur (Figure 3). L'eau est chauffée jusqu'à son point d'ébullition, des bulles de vapeur se forment en elle, montent et se brisent à travers la surface. Pendant l'ébullition, l'espace immédiatement au-dessus de l'eau se remplit de vapeur. En pratique, à cause de la turbulence et de l'éclaboussement, lorsque les bulles de vapeur se brisent près de la surface de l'eau, l'espace vapeur contient un mélange de gouttes d'eau et de vapeur. La vapeur produite dans l'espace supérieure de la bouilloire et dans toute chaudière à calandre, lorsque la chaleur est fournie uniquement à l'eau, ne peut être considérée que comme de la "vapeur saturée". Obtenir un gaz pur 'sec' est impossible à réaliser là où la vapeur reste en contact avec la surface de l'eau, et, en pratique, la vapeur saturée formée de cette façon peut généralement contenir 5% d'eau en masse.

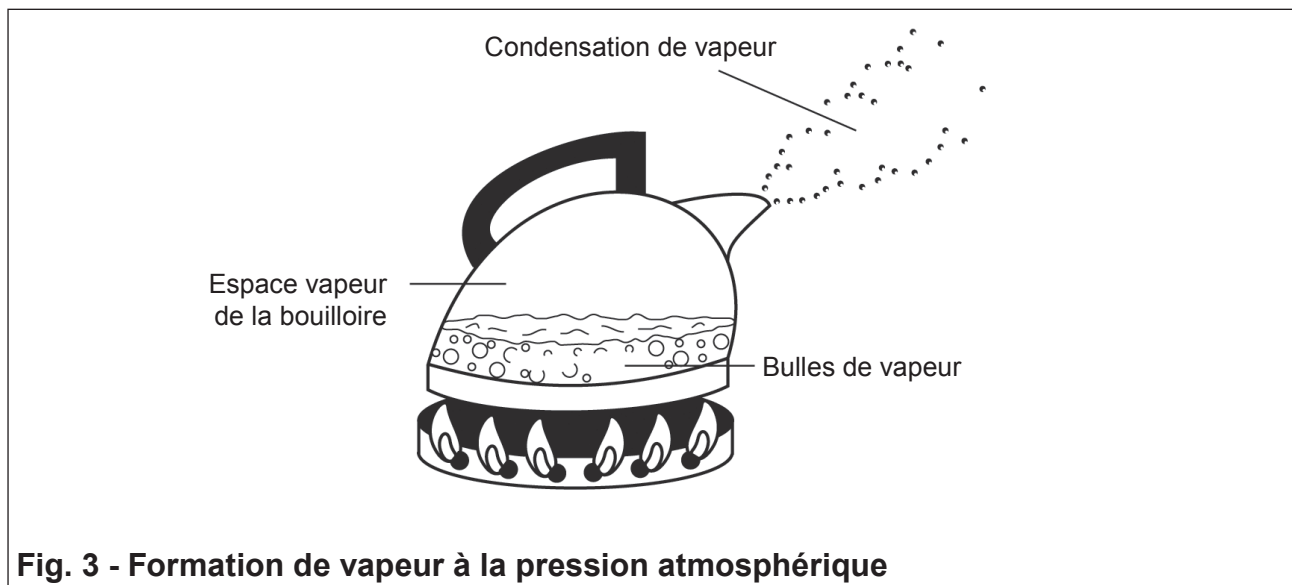


Fig. 3 - Formation de vapeur à la pression atmosphérique

Si la vapeur peut s'écouler de la chaudière au même débit qu'elle est produite, plus de chaleur augmentera simplement le taux de production. Si la vapeur est retenue dans la chaudière, et que le taux d'entrée de chaleur est maintenu, l'énergie s'écoulant dans la chaudière peut être plus importante que l'énergie qui en sort. Cet excès d'énergie fait augmenter la pression, qui à son tour fait augmenter la température, jusqu'à ce que la température de la vapeur saturée corresponde à la température de saturation de la nouvelle pression.

La chaleur ajoutée à l'eau pour augmenter sa température au point d'ébullition, et la chaleur ajoutée pour évaporer l'eau vapeur sont appelées différemment.

3.2 Enthalpie liquide ou enthalpie de l'eau ou chaleur sensible (symbole h_f)

C'est l'énergie thermique de l'eau en phase liquide jusqu'à sa température d'ébullition. Le terme 'chaleur sensible' a évolué car la chaleur ajoutée à l'eau produit un changement de température, toutefois, le terme accepté aujourd'hui est enthalpie liquide ou enthalpie de l'eau. Le terme 'enthalpie de l'eau' sera utilisée dans ce document.

La quantité de chaleur nécessaire pour augmenter 1 kg d'eau de 0°C à sa température d'ébullition peut être lue dans la colonne h_f des tables de vapeur abrégées présentées pages suivantes.

Par exemple : A la pression atmosphérique (0 bar eff.), l'eau bout à 100°C, et une énergie de 419 kJ est nécessaire pour chauffer 1 kg d'eau de 0°C à sa température d'ébullition de 100°C. C'est à partir de ces calculs que la chaleur spécifique de l'eau (C_p) est déduite, dans la plupart des cas en utilisant la moyenne entre 0°C et 100°C.

$$\text{c.à.d. } \frac{419 \text{ kJ}}{100^\circ\text{C}} = 4,19 \text{ kJ}/^\circ\text{C}$$

3.3 Enthalpie d'évaporation, enthalpie de vaporisation, chaleur latente (symbole h_{fg})

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour obtenir le changement d'état de l'eau, à sa température d'ébullition, en vapeur à la même température. Lorsqu'on ajoute de la chaleur, il n'y a pas de changement de température du mélange vapeur/eau, toute l'énergie est utilisée pour modifier l'état liquide en état vapeur. Le terme 'chaleur latente' résulte du fait qu'un apport de chaleur n'entraîne pas de changement de température.

Le terme maintenant accepté est enthalpie d'évaporation, mais le terme 'chaleur latente' est toujours couramment utilisé. La quantité de chaleur nécessaire pour évaporer 1 kg d'eau à sa température d'ébullition peut être lue dans la colonne h_{fg} des Tables de Vapeur de la page suivante. Le terme 'enthalpie d'évaporation' sera celui utilisé dans ce document. Par exemple, à la pression atmosphérique, 2 257 kJ permettra de faire évaporer 1 kg d'eau à 100°C en 1 kg de vapeur à 100°C.

3.4 Energie totale (symbole h_g)

C'est l'énergie totale dans la vapeur, et il s'agit simplement de la somme de l'enthalpie de l'eau et de l'enthalpie d'évaporation. Cette information peut aussi être lue dans les Tables de Vapeur (une version abrégée est présentée dans le Tableau 1 de la page suivante).

Par exemple, à la pression atmosphérique, l'eau bout à 100°C, et une énergie de 419 kJ est nécessaire pour chauffer 1 kg d'eau de 0°C à sa température d'ébullition de 100°C.

Une énergie supplémentaire de 2 257 kJ est nécessaire pour faire évaporer 1 kg d'eau à 100°C en 1 kg de vapeur à 100°C.

L'énergie totale est $419 + 2\,257 = 2\,676 \text{ kJ}$.

3.4.1 Tableau 1 - Table de la vapeur abrégée

Pression en bar eff.	Température en °C	Enthalpie en kJ/kg			Volume m³/kg
		Eau h_f	Evaporation h_{fg}	Vapeur h_g	
0	100	419	2 257	2 676	1,673
1	120	506	2 201	2 707	0,881
2	134	562	2 163	2 725	0,603
3	144	605	2 133	2 738	0,461
4	152	671	2 108	2 749	0,374
5	159	641	2 086	2 757	0,315
6	165	697	2 066	2 763	0,272
7	170	721	2 048	2 769	0,240

3.5 Vapeur à une pression supérieure à la pression atmosphérique

Lorsque la vapeur transfère sa chaleur à un process, c'est l'enthalpie d'évaporation qui est d'abord transférée, conséquence de la condensation de la vapeur en eau à la même température. L'enthalpie d'évaporation est la portion 'utile', lorsque la vapeur est utilisée pour le transfert thermique.

La vapeur à la pression atmosphérique a une utilisation pratique limitée pour le transport d'énergie. En effet, elle ne peut pas être transportée sous l'effet de sa propre pression le long d'une tuyauterie vapeur jusqu'à son point d'utilisation.

Ainsi, pour des applications pratiques, la vapeur est produite dans une chaudière à une pression supérieure à celle nécessaire pour l'application considérée.

Si l'eau est à une pression supérieure à la pression atmosphérique, sa température doit être augmentée au-dessus de 100°C pour obtenir l'ébullition.

3.5.1 Exemple

A 7 bar eff, le point d'ébullition de l'eau est de 170°C.

Il s'ensuit qu'il faut apporter plus d'énergie dans l'eau pour augmenter sa température au point d'ébullition à 7 bar eff qu'il ne faudrait si l'eau était à la pression atmosphérique. Les tables de vapeur donnent la valeur de 721 kJ pour porter 1 kg d'eau de 0°C à une température d'ébullition de 170°C, sous une pression de 7 bar eff.

Toutefois, l'enthalpie spécifique d'évaporation nécessaire à 7 bar eff.

pour changer 1 kg d'eau complètement en vapeur (2 048 kJ) est inférieure à celle requise pour de l'eau à la pression atmosphérique (2 257 kJ). Les tables indiquent ainsi que l'enthalpie spécifique d'évaporation diminue lorsque la pression de la vapeur augmente.

La Figure 4, page 12, donne différents exemples jusqu'à une pression de 14 bar eff. Elle montre comment l'enthalpie spécifique d'évaporation diminue lorsque la pression augmente. A première vue, cela semble être un inconvénient lorsqu'on utilise de la vapeur à des pressions plus hautes. Se référer à la section suivante "Relations entre Pression de vapeur et Enthalpie", page 14.

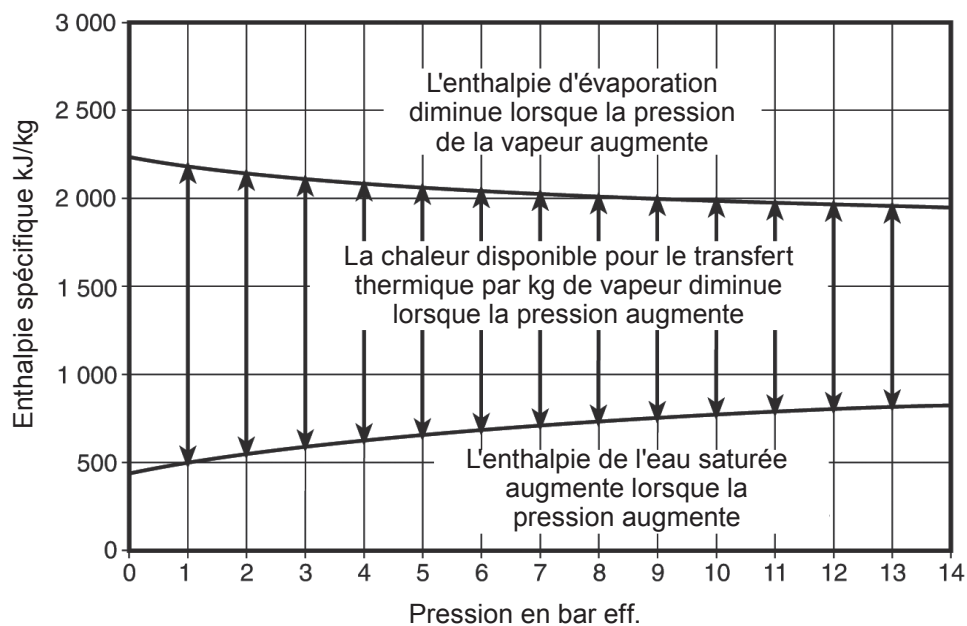


Fig. 4 Relations entre pression et enthalpie spécifique de la vapeur saturée sèche

3.6 Relations pression/température de la vapeur d'eau

En traçant les valeurs de la température de la vapeur en fonction de la pression, on obtient une courbe comme indiqué Figure 5 ; on l'appelle courbe de saturation. L'eau et la vapeur peuvent coexister en tout point de cette courbe, la température d'ébullition et la pression correspondante des deux phases restant constantes. L'eau et la vapeur à cette condition d'ébullition (ou de condensation) sont appelées respectivement eau saturée et vapeur saturée, parce qu'elles sont saturées d'énergie thermique. Si la vapeur saturée ne contient pas d'eau saturée ou si elle n'est pas en présence d'eau saturée, elle est appelée vapeur saturée 'sèche'. L'eau à une condition inférieure à celle de la courbe peut être appelée eau sous-saturée ou eau sous-refroidie. En pratique, c'est de l'eau dans son état liquide courant.

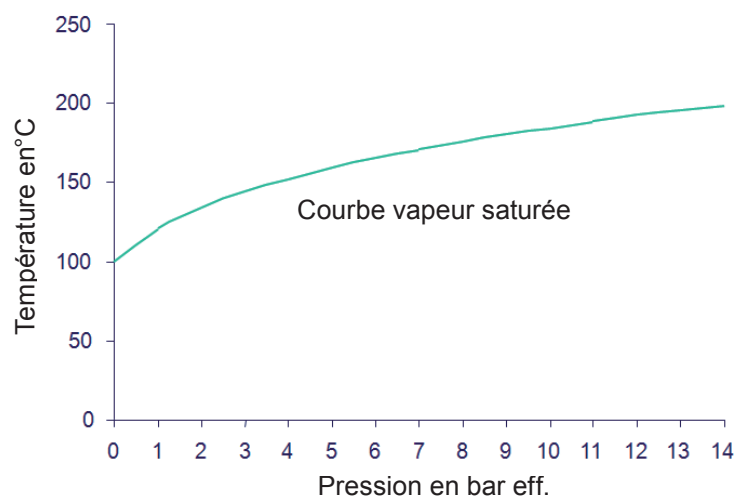


Fig. 5 Relations pression/température de la vapeur d'eau (courbe de saturation)

La vapeur à une condition supérieure à celle de la courbe de saturation est appelée vapeur surchauffée. Sa température supérieure à la température de saturation qualifie le degré de surchauffe.

3.7 Relations pression/volume de la vapeur d'eau

La masse volumique (ρ) d'une substance est rapport de la masse (M) par le volume (V) de la substance. Le volume spécifique (v) est l'inverse de la masse volumique c.-à-d. le rapport du volume par la masse.

L'unité pour la masse volumique (ρ) est le kg/m^3 , l'unité pour le volume spécifique (v) est le m^3/kg .

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1}{v}$$

Si l'on considère la structure moléculaire des liquides et des vapeurs, la masse volumique de la vapeur est vraiment inférieure à celle de l'eau, parce que les molécules de la vapeur sont séparées les unes des autres.

Aux conditions atmosphériques classiques, les masses volumiques de l'eau et de la vapeur sont respectivement $1\,000\text{ kg/m}^3$ et $0,6\text{ kg/m}^3$, une différence de presque 1 700 fois. Cette énorme différence sera constatée si on laisse bouillir de l'eau dans une bouilloire - la vapeur qui en résulte remplira rapidement le volume entier.

Lorsque la pression de la vapeur augmente, la masse volumique de la vapeur augmentera aussi. Inversement, le volume spécifique diminuera.

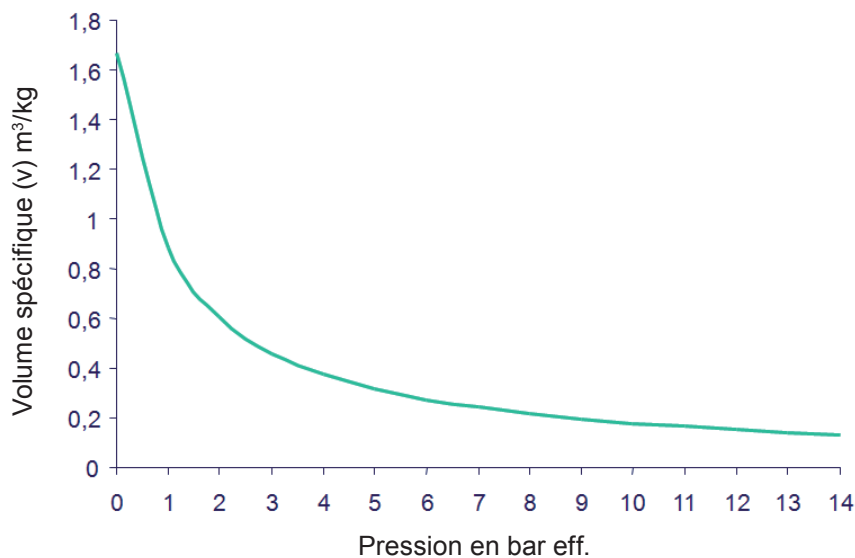


Fig. 6 Relations pression/volume de la vapeur d'eau

En traçant le volume spécifique de la vapeur en fonction de sa pression, on obtient la courbe présentée Figure 6. Elle indique comment la vapeur prend moins d'espace lorsque sa pression augmente ou, comment, d'une autre manière, une vapeur à pression plus élevée contient plus de masse.

3.8 Relations pression/enthalpie de la vapeur d'eau

Le Tableau 2 ci-dessous montre que lorsque la pression de vapeur augmente, l'enthalpie spécifique d'évaporation (kJ/kg) diminue. Par exemple, 1 kg de vapeur à 2 bar eff. a une enthalpie d'évaporation de 2 133 kJ, alors que 1 kg de vapeur à 14 bar eff. a une enthalpie de 1 947 kJ, suggérant que presque 14 % de chaleur 'utile' en moins sont disponibles à la pression la plus élevée. Cela semble indiquer que la vapeur à des pressions plus élevées a moins de potentiel pour transporter la chaleur. En fait, l'inverse est vrai, parce que lorsque sa pression augmente, la vapeur devient plus dense, permettant ainsi à un débit plus important et ainsi à plus de chaleur de s'écouler dans la tuyauterie. Analysez ce qui suit !

3.8.1 Tableau 2 - Table de la vapeur abrégée et enthalpie par volume

Vapeur saturée sèche				
Pression (P) (bar eff.)	Enthalpie spécifique d'évaporation (h_{fg}) (kJ/kg)	Volume spécifique (v) (m ³ /kg)	Densité (ρ) (kg/m ³)	Enthalpie par volume (kJ/m ³)
atmosphérique	2 257	1,673	0,598	1 349
1	2 201	0,881	1,135	2 498
2	2 163	0,603	1,658	3 587
3	2 133	0,461	2,169	4 627
4	2 108	0,374	2,674	5 636
5	2 086	0,315	3,175	6 622
6	2 066	0,272	3,676	7 596
7	2 048	0,240	4,167	8 533
8	2 031	0,215	4,651	9 447
9	2 015	0,194	5,155	10 387
10	2 000	0,177	5,650	11 299
11	1 986	0,163	6,135	12 184
12	1 973	0,151	6,623	13 067
13	1 960	0,141	7,092	13 900
14	1 947	0,132	7,576	14 750

Par exemple le tableau 2 montre qu'un mètre cube de vapeur :

à 2 bar eff.

pèse 1,658 kg et contient 3 587 kJ d'enthalpie d'évaporation.

à 14 bar eff.

pèse 7,576 kg et contient 14 750 kJ d'enthalpie d'évaporation.

Dans cet exemple, un mètre cube de vapeur à la pression plus élevée est 4,57 fois plus lourd et contient 4,1 fois plus d'enthalpie d'évaporation. Quelle conséquence cela a-t-il sur le transport de la chaleur à différentes pressions ?

3.9 Pression de vapeur et transport de chaleur

C'est le transport de chaleur d'une extrémité à l'autre de la tuyauterie qui doit satisfaire toute demande. Les tuyauteries de vapeur doivent être dimensionnées pour réaliser cela avec des vitesses et pertes de charge acceptables. Les exemples suivants montrent comment la vapeur libère plus de chaleur à des pressions plus élevées.

3.9.1 Exemple 1

Comparer la vapeur sèche au même débit volumique de 0,01 m³/s s'écoulant dans deux tuyauteries pareillement dimensionnées chacune à des vitesses acceptables de 30 m/s, mais l'une à 2 bar eff., l'autre à 6 bar eff.

Conditions	Vapeur à 2 bar eff.		Vapeur à 6 bar eff.	
Débit volumique ($\dot{V}$)	0,01	m ³ /s	0,01	m ³ /s
Débit massique (par s) ($\dot{m}$)	$\dot{V}/v = 0,01658$	kg/s	$\dot{V}/v = 0,03676$	kg/s
Débit massique (par h) ($\dot{m}$)	60	kg/h	132	kg/h
Vitesse (C)	30	m/s	30	m/s
Enthalpie spécifique (h_{fg})	2 163 (d'après la table)	kJ/kg	2 066 (d'après la table)	kJ/kg
Volume spécifique (v)	0,603 (d'après la table)	m ³ /kg	0,282 (d'après la table)	m ³ /kg
Enthalpie par volume (h_v)	3 587 (d'après la table)	kJ/m ³	7 597 (d'après la table)	kJ/m ³
Chaleur fournie ($\dot{Q}$)	$\dot{V} \times h_v = 36$	kW	$\dot{V} \times h_v = 76$	kW

Conclusion :

La vapeur à des pressions plus élevées peut transporter plus d'énergie dans des tuyauteries de même taille.

3.9.2 Exemple 2

Comparer de la vapeur sèche fournissant des débits égaux de 100 kW dans des tuyauteries de diamètre nominal DN 25 (c.s.a. = 0,000 49 m²), l'une à 2 bar eff, l'autre à 6 bar eff.

Conditions		Vapeur à 2 bar eff.		Vapeur à 6 bar eff.	
Chaleur fournie ($\dot{Q}$)	100		kW	100	kW
Enthalpie par volume (h_v)	3 587 (d'après table)		kJ/m ³	7 597 (d'après table)	kJ/m ³
Débit volumétrique ($\dot{V}$)	$\dot{Q}/h_v = 0,027\ 88$		m ³ /s	$\dot{Q}/h_v = 0,013\ 16$	m ³ /s
Enthalpie spécifique (h_{fg})	2 163 (d'après la table)		kJ/kg	2 066 (d'après la table)	kJ/kg
Débit massique ($\dot{m}$)	$\dot{Q}/h_{fg} = 0,046\ 2$		kg/s	$\dot{Q}/h_{fg} = 0,048\ 4$	kg/s
Débit massique ($\dot{m}$)	= 166		kg/h	= 174	kg/h
Vitesse (C)	$\dot{V}/c.s.a. = 57$		m/s	$\dot{V}/c.s.a. = 27$	m/s

Conclusion :

La vapeur à pressions plus élevées peut transporter la même chaleur à des vitesses plus faibles dans des tuyauteries de même taille.

En fournissant le même débit thermique, la ligne vapeur de 6 bar eff transporte réellement un débit massique de vapeur légèrement plus important, mais comme la pression est beaucoup plus élevée, la masse volumique est plus élevée et le débit volumique est considérablement plus faible. Dans la tuyauterie de la même taille, la vitesse est donc aussi beaucoup plus faible, ce qui est acceptable à 6 bar eff (27 m/s) mais ce qui ne l'est plus à 2 bar eff (57 m/s).

Les débits de chaudière vapeur et les débits thermiques fournis par la vapeur sont souvent exprimés en kg/h plutôt qu'en kW.

Comme les tables de vapeur concernent des enthalpies par unités de masse, c.-à-d. des kJ/kg, il est pratique de dimensionner les tuyauteries à partir des débits massiques. Les tables de dimensionnement des tuyauteries sont facilement disponibles, elles donnent automatiquement les volumes spécifiques et les vitesses acceptables à différentes pressions. Si le débit thermique est donné en kW, le débit de vapeur peut facilement être calculé en kg/h comme suit :

$$\text{Débit vapeur (kg/h)} = \frac{\text{kW} \times 3600}{h_{fg}}$$

**Certains facteurs sont utilisés.
pour convertir les kW en kg/h**

- pour transporter de la vapeur dans des tuyauteries à haute pression, kW x 1,8 donnent de la vapeur en kg/h.
- pour utiliser de la vapeur dans un process à basse pression, kW x 1,7 donneront de la vapeur en kg/h.
(la différence est due au changement d'enthalpie à hautes et basses pressions).

Pour des débits dans des tuyauteries

- **débit massique** de vapeur dans une tuyauterie (kg/h) $= \frac{0,002827 \times D^2 \times C}{v}$
- **débit massique** de vapeur dans une tuyauterie (kW) $= \frac{h_{fg} \times D^2 \times C}{v \times 1,28 \times 10^6}$

où

D est le diamètre de tuyauterie sélectionné (mm)

C est la vitesse acceptable de la vapeur (m/s)

v est le volume spécifique à la pression dans la tuyauterie (m³/kg)

h_{fg} est l'enthalpie spécifique à la pression dans la tuyauterie (kJ/kg)

Le débit volumique est une fonction de la surface de section transversale de la tuyauterie et de la vitesse d'écoulement, c.-à-d. :

Débit volumique = vitesse d'écoulement x surface de la section transversale

V (m³/s) = C (m/s) x c.s.a. (m²)

3.10 Pression de vapeur et transfert thermique dans le process

Le taux de transfert thermique dans un appareil d'échange de chaleur est déterminé par l'équation :

$$\dot{Q} = \frac{U \times A \times \Delta T_m}{1000}$$

où

$\dot{Q}$	Taux de transfert thermique	(kW)
U	Coefficient de transfert thermique global	(W/m ² °C)
A	Surface de transfert thermique	(m ²)
ΔT_m^*	Différence entre les températures moyennes principales et secondaires	(°C)

*(le ΔT_m peut être calculé comme la différence de température moyenne logarithmique ou la différence de température moyenne arithmétique. La première est généralement notée LMTD et la dernière AMTD).

D'après l'équation précédente, on peut voir que le transfert de chaleur du côté vapeur vers le côté liquide de l'échangeur est affecté par trois facteurs.

- (a) U
- (b) A
- (c) ΔT_m

Si 'U' et 'A' sont constants, plus le ΔT_m dont on a besoin est important pour un transfert thermique important, plus la température de vapeur doit être élevée (et donc la pression), les autres paramètres restant égaux.

La pression de vapeur a donc un effet sur le transfert thermique. L'alimentation de vapeur doit pouvoir remplacer la vapeur lorsqu'elle se condense dans le process, et elle doit pouvoir le faire à la pression et à la température nécessaire, sans air ni gaz incondensables, et être dans une condition sèche et propre comme indiqué dans une section suivante.

Plus d'un facteur détermine la conception et les attentes d'une installation vapeur. Parce qu'il est généralement vrai que plus la pression de service de l'échangeur de chaleur est élevée, plus il doit être petit, la même chose n'est pas forcément vrai pour le coût. Les appareils et les accessoires fonctionnant à des pressions plus élevées demandent des standards plus stricts, l'installation et la maintenance deviennent alors plus coûteuses. A cause de cela, il est généralement moins coûteux que les appareils de process fonctionnent aux pressions les plus basses possibles. Toutes les installations ne sont pas conçues pour fonctionner à la même pression, mais la réduction de la pression au point d'utilisation réduit les coûts et entraîne certainement des avantages pratiques et économiques. Cela permet à la vapeur d'être distribuée à haute pression avec une réduction de la pression localement pour s'adapter à des process individuels.

Un avantage supplémentaire d'une installation fonctionnant avec de la vapeur à la pression la plus basse possible est la réduction de la production de la vapeur de revaporisation dans le système de condensat. Cela signifie une perte d'énergie plus faible dans les collecteurs dégazés à l'atmosphère pour les systèmes sans récupération de vapeur de revaporisation. Il y a moins de coups de béliet dans les tuyauteries de condensat résultant du contact entre la vapeur de revaporisation et les condensats.

Pour résumer, il est généralement pratique de transporter la vapeur à haute pression et de l'utiliser à basse pression.

Chapitre 4

Conditions de base de la vapeur

La vapeur doit être disponible au point d'utilisation :

- À la pression et à la température correcte.
- Sans air et gaz incondensables.
- Propre.
- Sèche.

Ces points sont étudiés dans les paragraphes suivants.

4.1 Température et pression correctes

La vapeur doit atteindre le point d'utilisation à la pression nécessaire pour l'application ou bien le rendement en sera affecté. Cela résulte du dimensionnement correct des tuyauteries.

4.2 Air et gaz incondensables

La présence d'air ne provoque pas seulement un problème parce que la température ne peut pas être déduite des lectures de la pression, mais elle agit aussi comme "une barrière au transfert thermique" qui sera étudiée dans une section suivante.

Les manomètres enregistrant la pression disponible peuvent être induits en erreur. Si la vapeur contient de l'air et des gaz incondensables, la température de la vapeur ne correspondra pas à la température de saturation indiquée dans les tables de vapeur.

Lorsque l'air est mélangé à de la vapeur, le contenu thermique du volume donné de vapeur est inférieur à celui du même volume de vapeur pure. Cela signifie que la température a diminué. C'est la conséquence de la Loi Dalton sur les Pressions Partielles.

4.2.1 Loi Dalton sur les pressions partielles

Elle établit que 'dans un mélange de vapeur et d'air, la pression totale est la somme de la pression partielle que chaque gaz exercerait, si chacun occupait le volume total'.

Si la pression totale d'un mélange vapeur / air est de 1 bar eff. (2 bar abs), et le mélange fait de trois parts de vapeur et d'une part d'air, alors :

Pression partielle de la vapeur = $\frac{3}{4} \times 2 \text{ bar abs} = 1,5 \text{ bar abs}$

Pression partielle de l'air = $\frac{1}{4} \times 2 \text{ bar abs} = 0,5 \text{ bar abs}$

D'après les tables de vapeur, la température de la vapeur saturée à 1,5 bar abs (0,5 bar eff.) est d'environ 111,6°C.

La température attendue d'après la lecture de la pression effective de 1 bar eff. (en supposant qu'il y a seulement de la vapeur) serait de 120°C.

Les appareils chauffés à la vapeur par ce mélange d'air et de vapeur se comporteront comme s'ils recevaient une vapeur à 0,5 bar eff, même si le manomètre enregistre une pression de 1 bar eff. Ainsi, si l'appareil avait besoin de 1 bar eff. pour donner son débit, le débit de chauffage ne pourrait pas être réalisé.

Dans de nombreux process, comme un stérilisateur d'hôpital ou un autoclave, une température minimale est essentielle pour le process, et même si la pression du mélange air/vapeur augmente, l'air pourra empêcher la stérilisation.

4.2.2 Sources d'air et de gaz incondensables

L'air est présent dans les tuyauteries d'alimentation de vapeur et dans l'appareil lui-même au démarrage. Même si le réseau était rempli de vapeur pure la dernière fois où il a été utilisé, la vapeur se condense à l'arrêt, et l'air entre à l'intérieur grâce au vide qui en résulte. L'air peut aussi entrer dans le réseau en solution avec l'eau alimentaire de la chaudière.

A 80°C, l'eau peut dissoudre environ 0,6 % de son volume d'air. La solubilité de l'oxygène est approximativement double de celle de l'azote. Cela signifie que "l'air" qui se dissout dans l'eau contient près d'une part en oxygène et deux parts en azote, au lieu d'une part sur quatre contenues par l'air atmosphérique.

Le dioxyde de carbone a une aussi grande solubilité, près de 30 fois plus que l'oxygène.

L'eau d'alimentation d'appoint et le condensat, exposés à l'atmosphère, peuvent facilement absorber ces gaz. Lorsque l'eau est chauffée dans la chaudière, les gaz sont évacués avec la vapeur, et transportés dans le réseau de distribution.

A moins que l'eau ne soit complètement déminéralisée et dégazée, elle contient du carbonate de sodium soluble (dû à la réaction du carbonate de calcium avec le zéolite de sodium) qui permet d'éviter un pénible entartrage par le calcium à l'intérieur de la chaudière. Le carbonate de sodium peut se dissocier dans la chaudière et le dioxyde de carbone est libéré.

Avec des chaudières dont la pression est plus élevée, l'eau d'alimentation passe souvent dans un dégazeur avant d'être pompée vers la chaudière. Les meilleurs dégazeurs peuvent réduire les niveaux d'oxygène à 0,003 cm³ par litre d'eau (une quantité très faible), et l'oxygène résiduel peut être détruit par un traitement chimique.

Toutefois, toute quantité d'oxygène sera accompagnée par 0,006 cm³ par litre d'azote, que le traitement chimique ignore. Si la chaudière est de taille moyenne, produisant 10 000 kg/h de vapeur, elle utilise environ 10 000 litres d'eau par heure, et transporte 60 cm³ d'azote.

En 1 000 heures (ou environ 6 semaines continues de production de vapeur) – cela correspond à 60 litres d'azote atmosphérique. Ces gaz entrant à l'intérieur d'échangeurs de chaleur ayant une surface totale de transfert thermique de 50 mètres carrés, il y a assez d'azote pour produire une couche épaisse de 1 mm à la pression atmosphérique, et proportionnellement moins sous pression. A 7 bar eff., l'azote s'étale de façon égale dans le système, ce qui a l'effet similaire à l'addition de deux mètres de cuivre sur les surfaces d'échange thermique. (En pratique, une épaisseur de 1 mm ne se produira jamais, elle est indiquée ici simplement pour montrer de manière académique que l'air est un sérieux problème qui doit être pris en compte).

Les meilleures solutions mécaniques et chimiques laissent néanmoins une certaine quantité de gaz incondensables s'évacuer de la chaudière avec la vapeur.

Lorsque les échangeurs de chaleur sont alimentés avec une vapeur via les régulations de température, il faut utiliser des casses vide pour permettre d'évacuer les condensats dans le cas de fonctionnement sous vide, mais alors davantage d'air est admis dans le système 'supposé fermé'.

L'air est plus répandu dans les réseaux vapeur qu'on ne l'imagine. Il limitera insidieusement le débit et entraînera de la corrosion si sa présence est ignorée ou négligée. Le petit investissement qui consiste à installer des purgeurs pour éradiquer l'air des réseaux de vapeur en vaut la peine.

4.3 Propreté de la vapeur

Il existe de nombreuses sources d'encrassement dans tous les systèmes de vapeur.

- L'entraînement de solides par l'eau de chaudière dû à un dysfonctionnement de la chaudière.
- L'entartrage de la chaudière.
- Scories de soudures.
- Produits d'étanchéité appliqués de manière incorrecte ou excessive.

Toutes ces substances superflues sont nuisibles au fonctionnement efficace d'un système vapeur. Parce que :

- Un excès de produits de traitement d'eau de la chaudière se déposera directement sur les surfaces de transfert thermique et réduira le taux de transmission thermique.
- L'entartrage des tuyauteries et autres scories peuvent interférer avec le fonctionnement des vannes de régulation et les purgeurs de vapeur. Les filtres constituent la protection essentielle contre les impuretés provenant des tuyauteries (Figure 7).
- La protection contre l'entraînement des produits de traitement de la chaudière ne peut pas être bien réalisée avec un filtre, mais un séparateur permettra de réduire l'entraînement en évacuant tous les éléments dissous dans les gouttelettes d'eau.

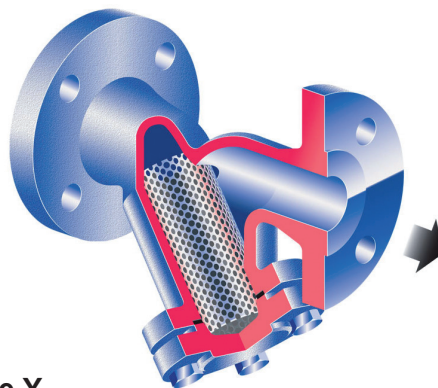


Fig. 7 Un filtre classique - type Y

4.4 Qualité correcte de la vapeur

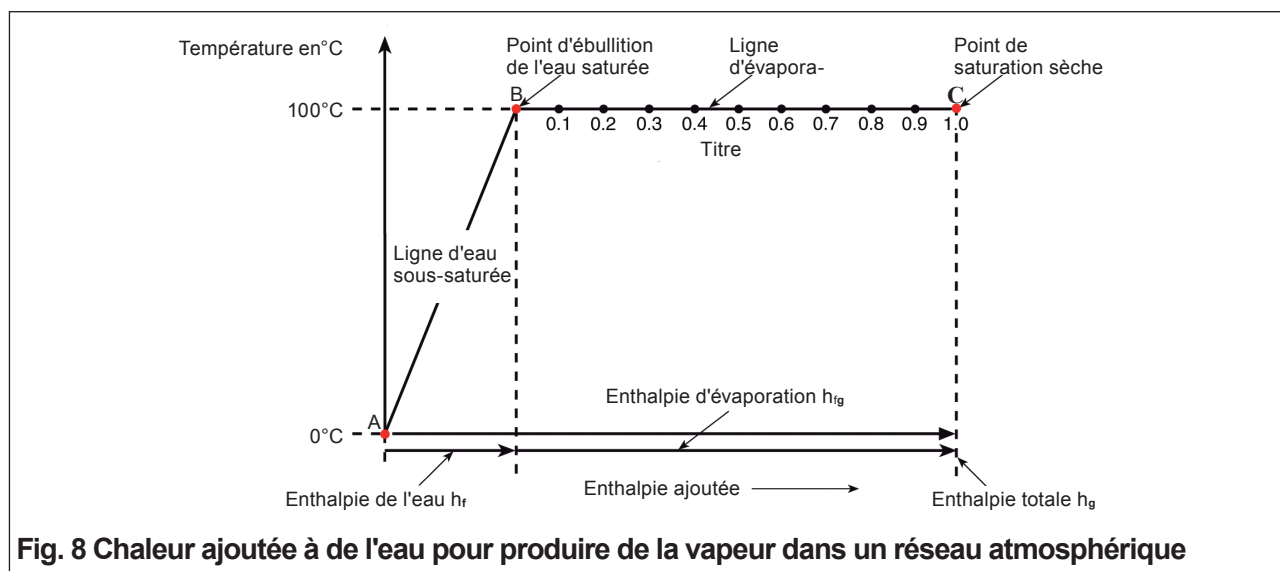
Le terme 'qualité de vapeur' caractérise généralement le degré d'humidité de la vapeur, dans la mesure où elle affecte le comportement des réseaux de distribution et les process. Sa mesure est le titre.

4.4.1 Vapeur humide et titre

Une condition 'sèche' à 100 % concerne une vapeur qui a absorbé la quantité maximale possible d'enthalpie d'évaporation, et s'appelle vapeur "saturée sèche". La plupart des chaudières à vapeur à calandre produiront une vapeur avec une sécheresse d'environ 95 % ou plus. La vapeur qui contient de l'humidité s'appelle vapeur 'humide'.

On dit que la vapeur saturée sèche à 100 % a un titre (x) de 1,0. La vapeur dont 5 % de la masse existante est de l'eau, est sèche à 95 %. Elle a un titre de 0,95 c.-à-d. $(1 - 0,05)$. Le titre est complexe à mesurer en dehors d'un laboratoire, et il est généralement estimé par des ingénieurs suivant les conditions existantes.

Le graphique suivant (Figure 8) présente les relations entre la chaleur ajoutée à l'eau à la pression atmosphérique, et la production conséquente de la vapeur saturée sèche.



Dans la Figure 8, la ligne entre les points 'A' et 'B' montre que la chaleur ajoutée à l'eau augmente sa température jusqu'au point 'B', le point d'ébullition, qui est atteint à 100°C. Au point 'B', aucune vapeur ne s'est évaporée, le titre est donc nul. D'autres additions de chaleur feront évaporer l'eau à une température constante de 100°C jusqu'à ce que le point 'C' soit atteint, la vapeur pourra alors être considérée comme étant sèche à 100 %. La différence significative entre le point 'B' et le point 'C' est la quantité d'enthalpie d'évaporation que l'eau a absorbée pour être complètement évaporée. Au point 'B', chaque kg d'eau contient 419 kJ, au point 'C', chaque kg de vapeur sèche contient 2 676 kJ. La différence entre les deux est la quantité ajoutée d'enthalpie d'évaporation, qui dans un réseau atmosphérique serait de 2 257 kJ.

Les calculs précédents ne sont vrais qu'à une pression, c.-à-d. atmosphérique. Si la pression du réseau est modifiée, la température de saturation, l'enthalpie spécifique et le volume spécifique le seront également, comme indiqué sur les Tables de vapeur.

4.4.2 La vapeur humide et sa conséquence sur le contenu thermique de la vapeur

Les Tables de vapeur pour la vapeur saturée montrent les propriétés de la vapeur saturée sèche. En pratique, la vapeur provenant d'une chaudière, autre qu'installée avec un surchauffeur, produira de la vapeur avec une certaine proportion d'eau.

Cette eau ne contient pas d'enthalpie d'évaporation (autrement ce serait de la vapeur), en conséquence, l'enthalpie d'évaporation par kg de vapeur humide est réduite proportionnellement à la masse d'eau.

Considérons de la vapeur à une pression de 7 bar eff avec 5 % d'eau en masse, c.-à-d. $x = 0,95$.

Chaque kilo de cet échantillon de vapeur contiendra toute l'enthalpie de l'eau mais comme seulement 0,95 kg de la vapeur sèche est présente, il n'y aura que 0,95 de l'enthalpie d'évaporation donnée dans la table de vapeur.

Ainsi, le montant de l'enthalpie d'évaporation disponible pour le transfert thermique par la vapeur humide sera de $0,95 \times h_{fg}$.

$$= 0,95 \times 2\,047,7 \text{ kJ/kg}$$

$$= 1\,945,3 \text{ kJ/kg} \text{ # (utilisé dans l'exemple ci-dessous)}$$

Ce calcul représente une réduction de 102,4 kJ par kg d'après ce qui est indiqué sur les tables de vapeur à 7 bar eff, un kg de vapeur humide a donc moins d'enthalpie d'évaporation qu'un kg de vapeur saturée sèche à la même pression.

Chapitre 5

Barrières au transfert thermique

5.1 L'air, l'eau et le tartre

Considérons le schéma suivant de la Figure 9 qui montre comment les résistances de l'air, de l'humidité et du tartre s'accumulent sur les surfaces de chauffage.

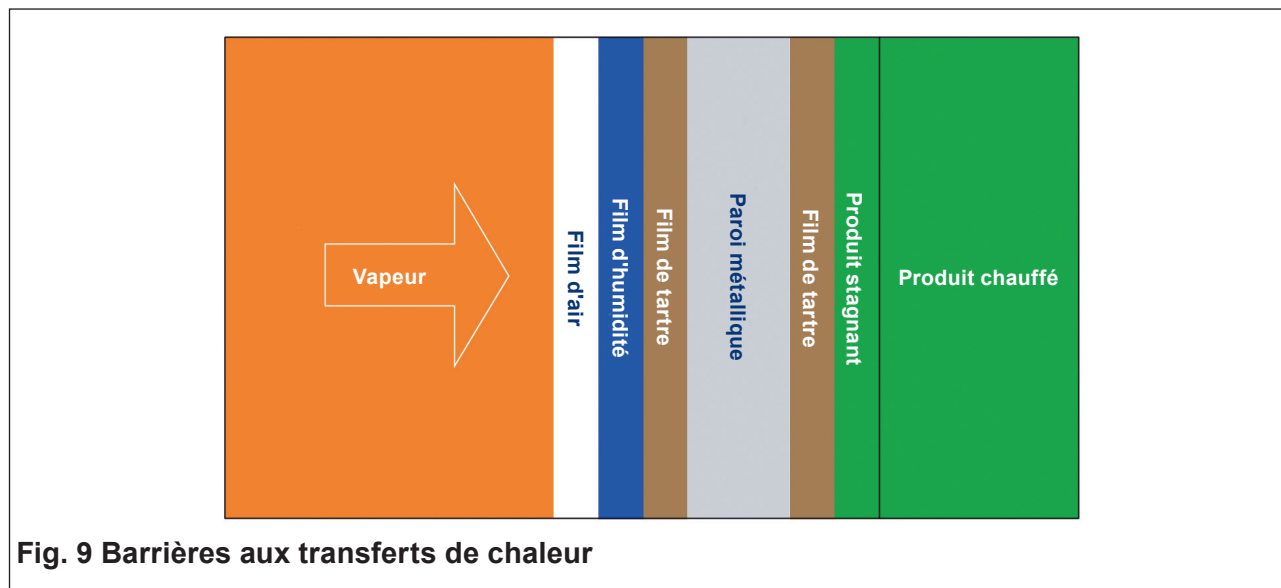


Fig. 9 Barrières aux transferts de chaleur

Sur la surface d'échange, du côté du produit, il y a un film stagnant du produit et sans doute un film de tartre du au produit 'en train de cuire'. Un nettoyage régulier permettra de maintenir un bon transfert de chaleur. Lorsque c'est possible, un dispositif mécanique peut réduire la résistance en enlevant le produit stagnant sur la surface. Cela assure une température plus basse du produit, ce qui permet de maintenir un gradient de température élevé, et une meilleure homogénéité de température.

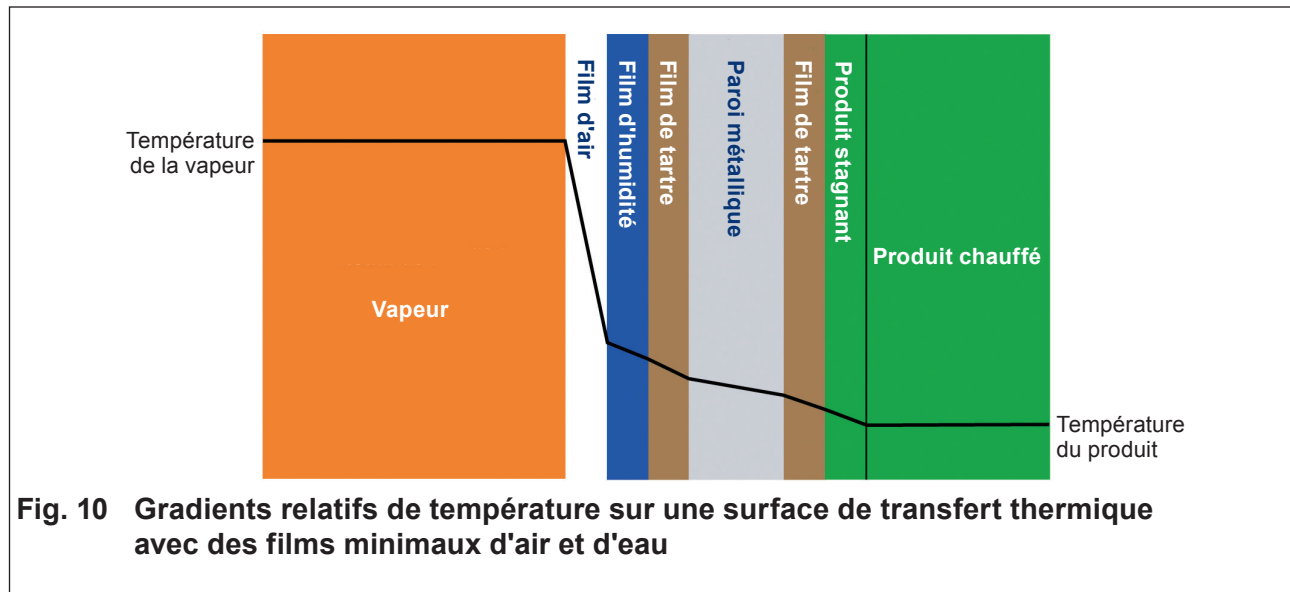
Sur la surface d'échange, du côté vapeur, il peut y avoir un film fait de rouille et d'impuretés provenant des tuyauteries et de l'entraînement de la chaudière. Les impuretés peuvent être évacuées en nettoyant régulièrement les filtres installés sur l'alimentation vapeur.

En plus du film d'impuretés entre la vapeur et la paroi métallique, il y en a deux autres. L'un est le film d'eau composé de condensat et des humidités apportées par la vapeur humide, l'autre est un film d'air qui offre encore une plus grande résistance au transfert thermique que l'eau. Ces films se forment naturellement, suite au transfert de chaleur lorsque la vapeur migre vers la paroi de transfert thermique et se condense. Si la vapeur fournie est humide ou mélangée avec de l'air, ces films seront plus épais que nécessaire.

L'air et l'eau doivent être évacués très rapidement et complètement si possible de l'espace vapeur, dans le cas contraire, le transfert de chaleur diminue et le débit du process sera réduit.

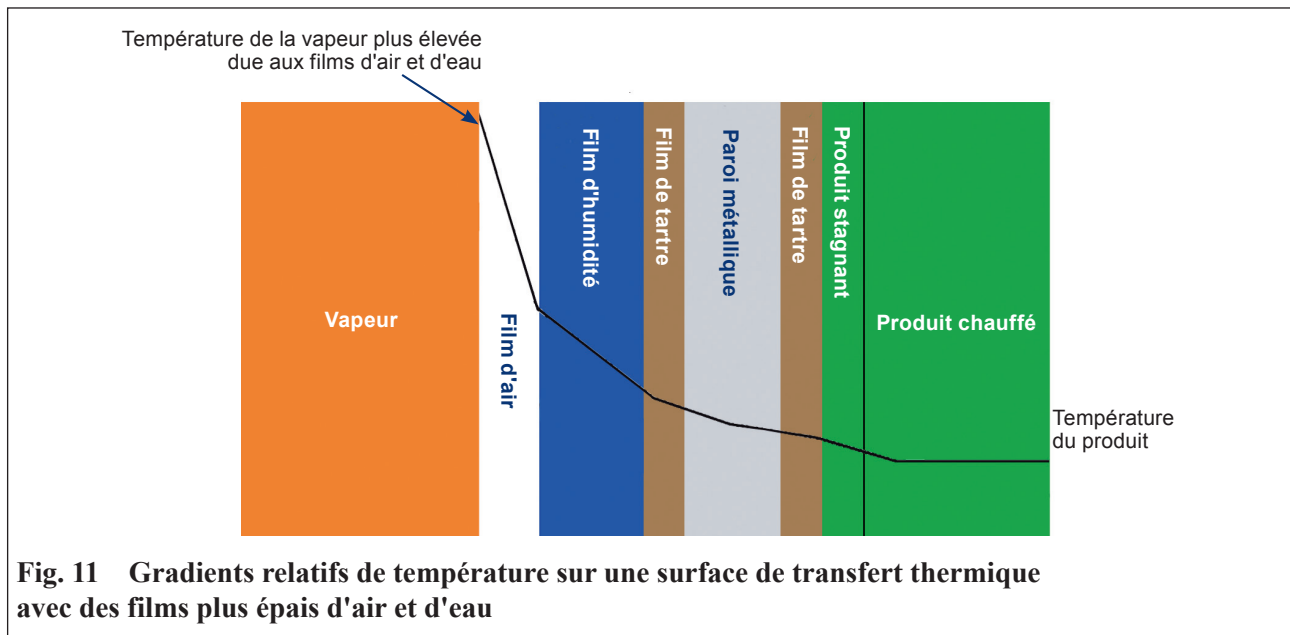
Les Figures 10 et 11 donnent une vue très proche de ce qui arrive sur la surface de chauffage. Un film d'eau d'une épaisseur de 0,6 mm (l'épaisseur de 2 ou 3 feuilles de papier classique) formera une résistance au transfert de chaleur aussi importante qu'une paroi de cuivre de presque 380 mm d'épaisseur !

La conséquence d'un film d'air est encore plus sévère. L'air est 1 100 fois plus résistant au débit de chaleur que l'acier, et jusqu'à 15 000 fois plus résistant que le cuivre. Cela signifie qu'un film d'air de seulement 0,025 mm (25 microns ou environ le tiers de l'épaisseur d'un cheveu humain), résistera autant au transfert de chaleur qu'une paroi de cuivre de 380 mm d'épaisseur.



Dans la Figure 10, de la vapeur à une certaine pression est nécessaire pour donner une certaine température de produit. Les calculs de l'échangeur de chaleur sont basés sur un coefficient de transfert thermique global 'U', et la fonction de l'échangeur de chaleur est basée sur la formule $Q = U \times A \times \Delta T_m$ où (T_m est la différence entre la température de la vapeur et la température moyenne du produit chauffé (°C), A est la surface de chauffage (m²) et U est le coefficient global de transfert de chaleur (W/m²°C).

Sur la Figure 11, l'épaisseur des films d'air et d'eau a augmenté et a donc réduit la valeur 'U'. Comme les conditions de chauffage n'ont pas évolué, le même chauffage doit être réalisé par de la vapeur à pression et température plus élevées. Lorsque c'est possible, l'échange thermique peut être atteint, si la surface d'échange est excédentaire ou alternativement, un échange thermique plus faible devra être accepté.



Pour résumer, les films d'air et d'eau sont présents sur les surfaces de transfert de chaleur dans toutes les applications qui utilisent le chauffage avec vapeur, et doivent être maintenus les plus faibles possibles. Un séparateur stratégiquement installé sur la ligne d'alimentation vapeur aidera à réaliser cela.

Chapitre 6

Vapeur surchauffée

6.1 Vapeur surchauffée provenant d'une chaudière

Si la vapeur produite dans une chaudière est exposée à une surface dont la température est plus élevée, sa température augmente alors au-delà de sa température de saturation. On l'appelle la vapeur 'surchauffée' et elle est exprimée par les degrés supérieurs à la température de saturation.

La surchauffe ne peut pas être apportée à la vapeur lorsqu'elle est en contact direct avec la vapeur saturée dans une chaudière à calandre. La vapeur saturée doit passer dans un échangeur de chaleur indépendant où le fluide primaire de chauffage sera généralement le conduit d'évacuation des gaz de la même chaudière.

6.2 Vapeur surchauffée provenant d'un appareil de détente

Le passage de la vapeur dans un orifice de vanne peut, dans certaines circonstances, provoquer la surchauffe de la vapeur. Ce qui est souvent le cas si la vapeur à l'entrée de la vanne de régulation est sèche à 100 % ou presque sèche, comme dans l'exemple présenté sur la Figure 12 ci-dessous. Cela peut se produire également avec de la vapeur humide si la perte de charge est élevée, disons supérieure à 8 bar eff. et détendue jusqu'à 1 bar eff. C'est important pour les process qui utilisent la vapeur non seulement pour chauffer directement le produit mais aussi pour l'humidifier. Un process de transformation en boulettes en est un très bon exemple, comme on peut le voir page 31.

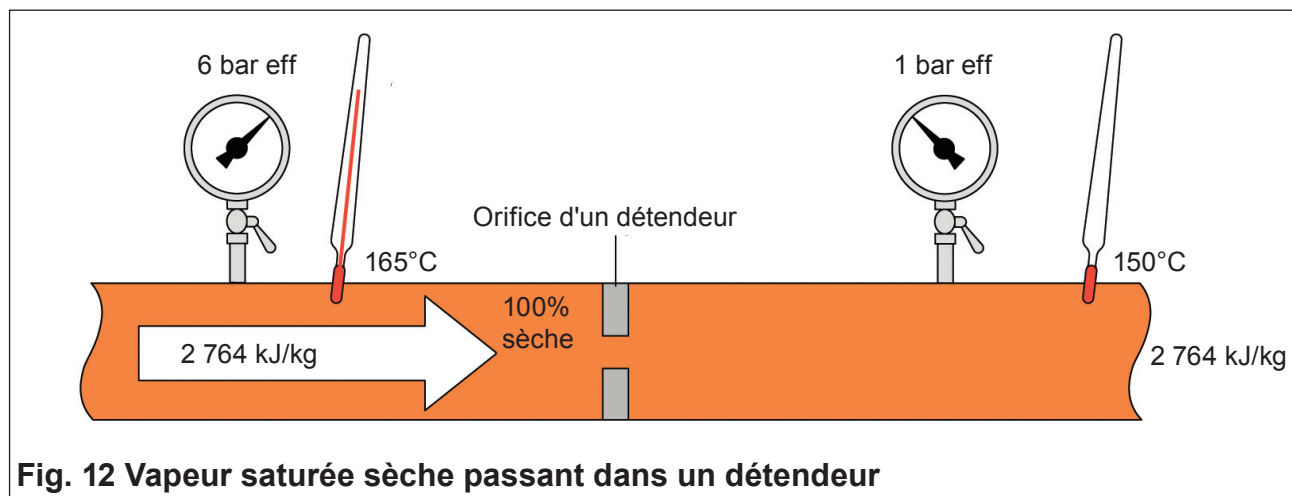


Fig. 12 Vapeur saturée sèche passant dans un détendeur

Condition de la vanne en amont du détendeur	6 bar eff., saturée sèche
Pression de la vapeur en aval	1 bar eff.
	$h_g = 2\,764 \text{ kJ/kg}$ (d'après les tables)

Considérons cet exemple comme un process adiabatique parfait qui n'utilise ni n'ajoute aucune énergie, l'enthalpie totale de la vapeur de chaque côté du détendeur sera constante à 2 764 kJ/kg.

D'après les Tables de vapeur, la température de saturation de la vapeur à 1 bar eff. est de 120°C et si c'était de la vapeur saturée sèche, son enthalpie totale (h_g) serait 2 707 kJ/kg. Comme l'enthalpie totale de la vapeur est constante dans ce process à 2 764 kJ/kg, il y a un excédent de chaleur dans la vapeur à la pression aval de 1 bar eff. C'est cet excédent de chaleur qui provoque l'augmentation de la température de la vapeur en aval - mais de combien augmente-t-elle ?

Elle peut être calculée à partir des premiers principes comme suit :
À la condition amont de 6 bar eff.,

Contenu thermique total de la vapeur, $h_g = 2\,764 \text{ kJ/kg}$
(d'après les tables)

Donc, dans ce réseau, d'après la condition aval de 1 bar eff, le contenu thermique total de la vapeur doit être le même.

$$h_g = 2\,764 \text{ kJ/kg}$$

contenu thermique total de vapeur saturée à 1 bar eff. $= 2\,707 \text{ kJ/kg}$
(d'après les Tables)

∴ chaleur en excès dans la vapeur aval $= 2\,764 - 2\,707 \text{ kJ/kg}$
 $= 57 \text{ kJ/kg}$

chaleur spécifique de la vapeur à cette condition $= 2,06 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
(d'après les Tables)

Donc, la température augmente à cause de l'excédent de chaleur dans la vapeur aval.

$$= \frac{57 \text{ kJ/kg}}{2,06 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}}$$

$$= 28^\circ\text{C}$$

et la température de la vapeur surchauffée à 1 bar eff. est : $120^\circ\text{C} + 28^\circ\text{C}$

$$= 148^\circ\text{C}$$

On peut également lire sur un diagramme de Mollier (diagramme enthalpie/entropie de la vapeur), décrit plus loin, que la vapeur à 1 bar eff. contenant 2 764 kJ/kg aura une température de 148°C.

Donc, on peut dire que la surchauffe de la vapeur à 1 bar eff. dans cet exemple est :

$$148^\circ\text{C} - 120^\circ\text{C} = 28^\circ\text{C} \text{ de surchauffe}$$

6.3 Vapeur saturée plus sèche provenant d'un appareil à pression élevée

Dans les réseaux de vapeur, la vapeur est rarement complètement sèche. Quelle que soit l'enthalpie additionnée à la vapeur, une détente à une pression réduite devra d'abord évaporer toute l'humidité inhérente avant de gérer la surchauffe. Si l'enthalpie est insuffisante pour évaporer complètement l'humidité présente, la surchauffe ne pourra pas être atteinte mais le titre (**x**) augmentera, ce qui améliorera la qualité de la vapeur saturée.

6.3.1 Exemple

Condition amont = 6 bar eff et '**x**' à 0,95

Conditions aval = 1 bar eff et calculer '**x**'

Pour la condition en **amont**,

Contenu thermique total

de la vapeur,

$$\begin{aligned}h_g &= h_f + (x \times h_{fg}) \\&= h_f + (0,95 \times h_{fg}) \\&= 698 \text{ kJ/kg} + (0,95 \times 2\,066) \text{ kJ/kg} \\&= 698 \text{ kJ/kg} + 1\,963 \text{ kJ/kg} \\&= 2\,661 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

Pour la condition en **aval**,

Contenu thermique total

de la vapeur,

$$\begin{aligned}h_g &= h_f + (x \times h_{fg}) \\ \text{c.à.d. } 2\,661 \text{ kJ/kg} &= 506 \text{ kJ/kg} + (x \times 2\,201 \text{ kJ/kg})\end{aligned}$$

$$(2\,201 \text{ kJ/kg} \times x) = (2\,661 - 506) \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore x = \frac{(2\,661 - 506) \text{ kJ/kg}}{2\,201 \text{ kJ/kg}}$$

$$= \frac{2\,155 \text{ kJ/kg}}{2\,201 \text{ kJ/kg}}$$

$$\text{titre } x = 0,98$$

Dans cet exemple, la vapeur n'est donc pas devenue surchauffée mais plus sèche à cause de l'excès d'enthalpie dans la vapeur à pression plus basse qui a partiellement évaporé l'humidité.

6.4 Applications de vapeur surchauffée

La vapeur surchauffée a des applications, par exemple, dans les turbines, où la vapeur est dirigée par des buses dans un rotor. Ce qui provoque la rotation du rotor. L'énergie ne vient que de la vapeur, la vapeur a donc moins d'énergie après qu'elle sera passée dans le rotor de la turbine. Si la vapeur était initialement à la température de saturation, cette perte d'énergie provoquerait une condensation d'une partie de la vapeur. Les turbines ont toujours plusieurs 'étages' : la vapeur purgée provenant du premier rotor est dirigée sur un second rotor accouplé sur le même arbre. La vapeur saturée va devenir de plus en plus humide au fur et à mesure des étapes et les particules d'eau vont sérieusement éroder et détériorer les aubes de la turbine.

Ce n'est pas la seule raison qui explique l'utilisation de la vapeur surchauffée dans les turbines. Tous les moteurs, comme une turbine, ont un rendement inférieur à 100%. L'efficacité maximale (possible uniquement en théorie) est donnée par l'expression :

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

où T_1 et T_2 sont les températures du fluide de service, c.-à-d. de la vapeur dans ce cas, à l'entrée, et à la purge du moteur. Selon le principe de Carnot, le rendement de la machine thermique est optimisé en diminuant la température de la vapeur T_2 à la purge, par exemple en augmentant le vide dans le condenseur, mais, en pratique, le vide est limité par la température du liquide de refroidissement du condenseur. La seule autre manière pour augmenter le rendement possible maximal est en augmentant T_1 , en surchauffant la vapeur du moteur. Bien sûr, les moteurs pratiques ont des rendements bien inférieurs à l'idéal ou rendement de 'Carnot' décrit ici.

La vapeur surchauffée à l'entrée de la turbine d'une centrale thermique peut être à 150 bar eff. et 550°C, avec plus de 200°C de surchauffe. La chaleur dans la portion de surchauffe peut être déterminée comme suit :

$$h_g \text{ pour la vapeur saturée à 150 bar eff} = 2\,611 \text{ kJ/kg}$$

$$h_g \text{ pour la vapeur à 150 bar eff et } 550^\circ\text{C} = 3\,445 \text{ kJ/kg}$$

donc l'énergie de surchauffe = 3 445 - 2 611 kJ/kg

$$= 834 \text{ kJ/kg}$$

Cette augmentation de chaleur peut, au premier abord, sembler utile pour le transfert thermique, mais le fait que la vapeur surchauffée soit très peu disposée à donner sa chaleur (lorsqu'elle ne se condense pas) est un phénomène naturel. Il faut la refroidir à la température de saturation avant de pouvoir l'utiliser profitablement pour le chauffage, et elle est donc peu appropriée pour ce propos, (le coefficient de transfert thermique avec de la vapeur surchauffée est ridiculement faible).

6.4.1 Exemple

La vapeur à 6 bar eff., 200°C a un contenu de chaleur de 2 846 kJ/kg, tandis que la vapeur saturée à 6 bar eff contient 2 764 kJ/kg de chaleur totale à la température de saturation de 165°C. La vapeur à 200°C doit être refroidie à 165°C, avant que l'enthalpie d'évaporation de 2 065 kJ/kg devienne disponible. La chaleur cédée en refroidissant de 35°C la température de la vapeur pour atteindre la température de saturation est de 82 kJ/kg ou d'environ 2,34 kJ/°C, ce qui indique que dans cette plage de température, la chaleur spécifique de la vapeur surchauffée est très basse, et que dans une application de transfert thermique, la vapeur surchauffée a peu d'intérêt.

Il existe des cas où la présence de surchauffe peut réellement réduire le rendement d'un process, lorsque le process dépend de l'humidité qui est communiquée par la vapeur au produit lorsqu'elle se condense. Le conditionnement de la nourriture animale avant la transformation en boulettes en est un exemple. L'humidité fournie par la vapeur est une partie essentielle du process. La vapeur surchauffée ne peut pas chauffer et humidifier correctement le produit et rend très difficile la mise en boulettes.

En positionnant les vannes de régulation de pression et de température à 6 m de l'entrée de ce type de process, et si les tuyauteries ne sont pas calorifugées, la vapeur atteindra le process dans une condition de saturation suffisante en raison des pertes par radiation des tuyauteries.

6.5 Le diagramme de Mollier (diagramme enthalpie - entropie)

Le diagramme de Mollier (page 34), simplifié, à petite échelle, présente les relations entre la pression (p), la température (t), l'enthalpie (h) et l'entropie (s) de la vapeur surchauffée, et le titre (x) de la vapeur saturée. (A ce point, il est important de décrire l'entropie).

L'entropie d'un fluide quantifie le degré de l'agitation moléculaire à une pression et une température données.

Evaporer de l'eau en vapeur augmente le degré d'agitation des molécules et en conséquence augmente l'entropie. Par contre, la condensation de la vapeur en liquide entraîne une diminution de l'entropie.

Bien que l'entropie soit une propriété thermodynamique d'un fluide, elle ne peut pas être mesurée directement car aucun instrument ne peut mesurer l'agitation des molécules. Si elle est utilisée le plus souvent pour des considérations académiques, il n'est généralement pas nécessaire de la connaître pour effectuer des calculs concernant le chauffage.

Le schéma définit deux zones : la vapeur surchauffée et la vapeur humide séparées par la courbe de saturation de la vapeur.

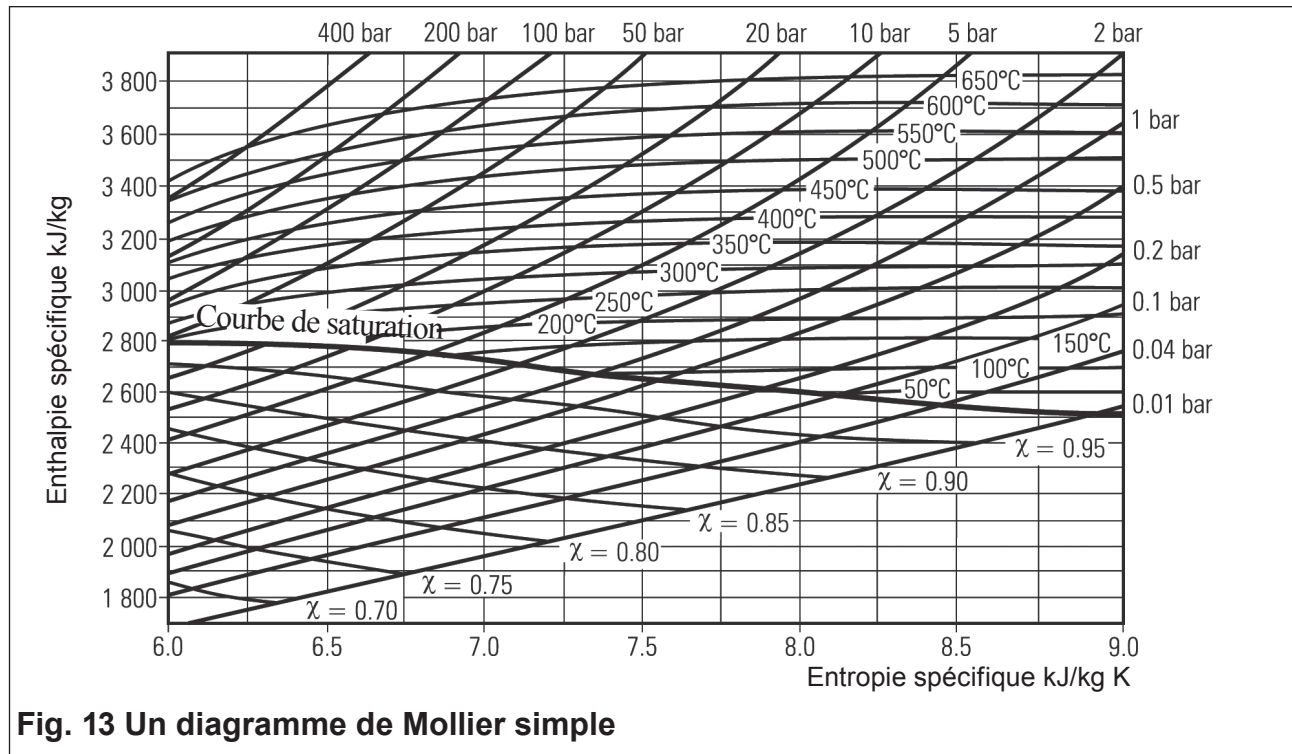


Fig. 13 Un diagramme de Mollier simple

Les lignes du schéma permettent de placer des points et si les points d'état initiaux et finaux d'un process sont connus, la ligne les joignant permet de représenter les modifications du process. Une détente 'parfaite' dans une turbine à vapeur ou un moteur à vapeur est représentée sur le diagramme par une ligne verticale descendante, parce qu'on peut présenter que c'est un process à entropie constante et à pression décroissante, résultant d'une perte d'enthalpie (voir figure 14a).

Tandis qu'un process de laminage parfait dans un détendeur peut être un process avec une enthalpie constante et une entropie ascendante, entraînant une perte de charge, peut donc être représenté sur le schéma par une ligne horizontale allant de gauche à droite (voir figure 14b).

Ces deux exemples illustrent les avantages à utiliser ce diagramme pour analyser les process vapeur ; en donnant une représentation en images de ces process. Toutefois, si le point d'état final d'un process se trouve en dehors de la zone couverte par le schéma, il faudra utiliser les tables et les calculs de base.

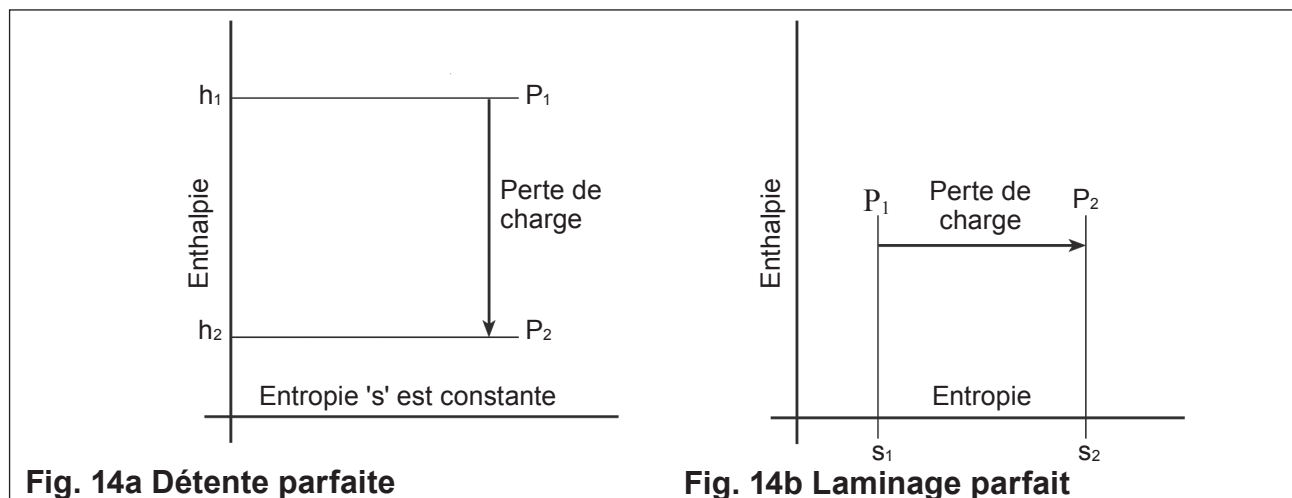


Fig. 14a Détente parfaite

Fig. 14b Laminage parfait

6.5.1 Exemple 1

Considérons une détente 'parfaite' de vapeur dans une turbine du point a au point b :

au point **a**,
 $P_1 = 50 \text{ bar abs}$
 $h_1 = 2\,935 \text{ kJ/kg}$
 $t_1 = 300^\circ\text{C}$
 $s_1 = 6,22 \text{ kJ/kg K}$

au point **b**,
 $P_2 = 0,2 \text{ bar abs}$
 $h_2 = 2\,050 \text{ kJ/kg}$
 $t_2 = 60^\circ\text{C}$
 $s_2 = 6,22 \text{ kJ/kg K}$, $x = 0,76$

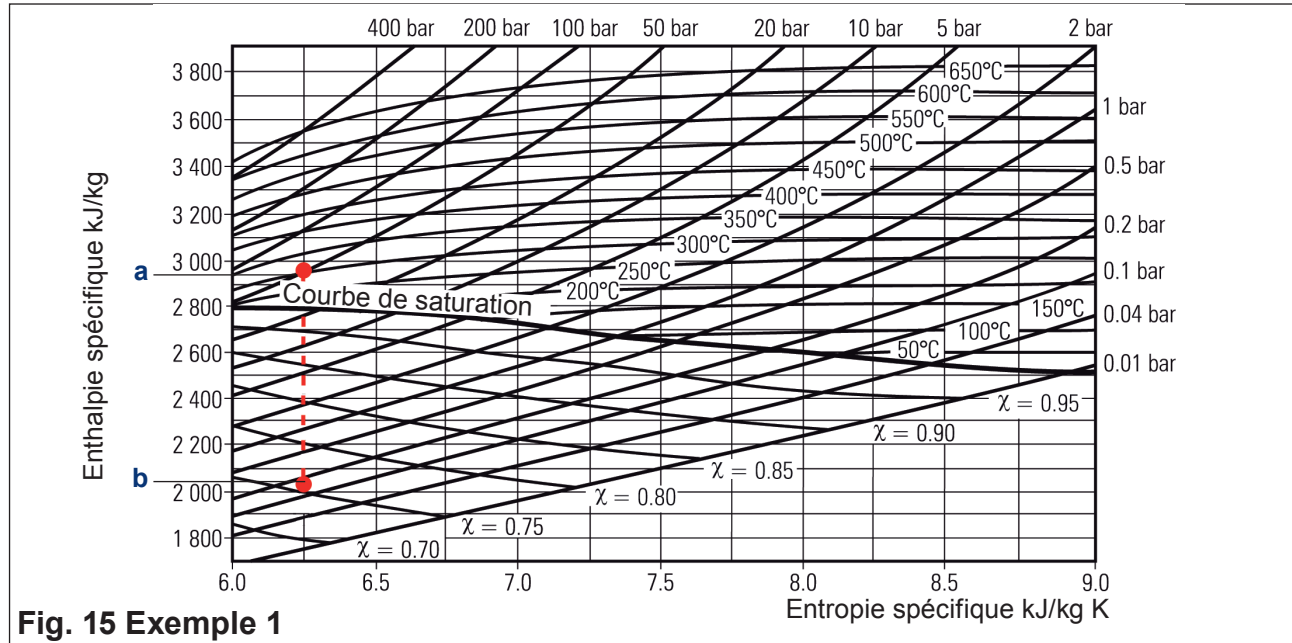


Fig. 15 Exemple 1

6.5.2 Exemple 2

Considérons un laminage 'parfait' de vapeur dans une vanne de détente du point a au point b :

au point **a**,
 $P_1 = 10 \text{ bar abs}$
 $h_1 = 2\,740 \text{ kJ/kg}$
 $t_1 = 180^\circ\text{C}$
 $s_1 = 6,49 \text{ kJ/kg K}$, $x = 0,98$

au point **b**,
 $P_2 = 5 \text{ bar abs}$
 $h_2 = 2\,740 \text{ kJ/kg}$
 $t_2 = 152^\circ\text{C}$
 $s_2 = 6,79 \text{ kJ/kg K}$, $x = 0,99$

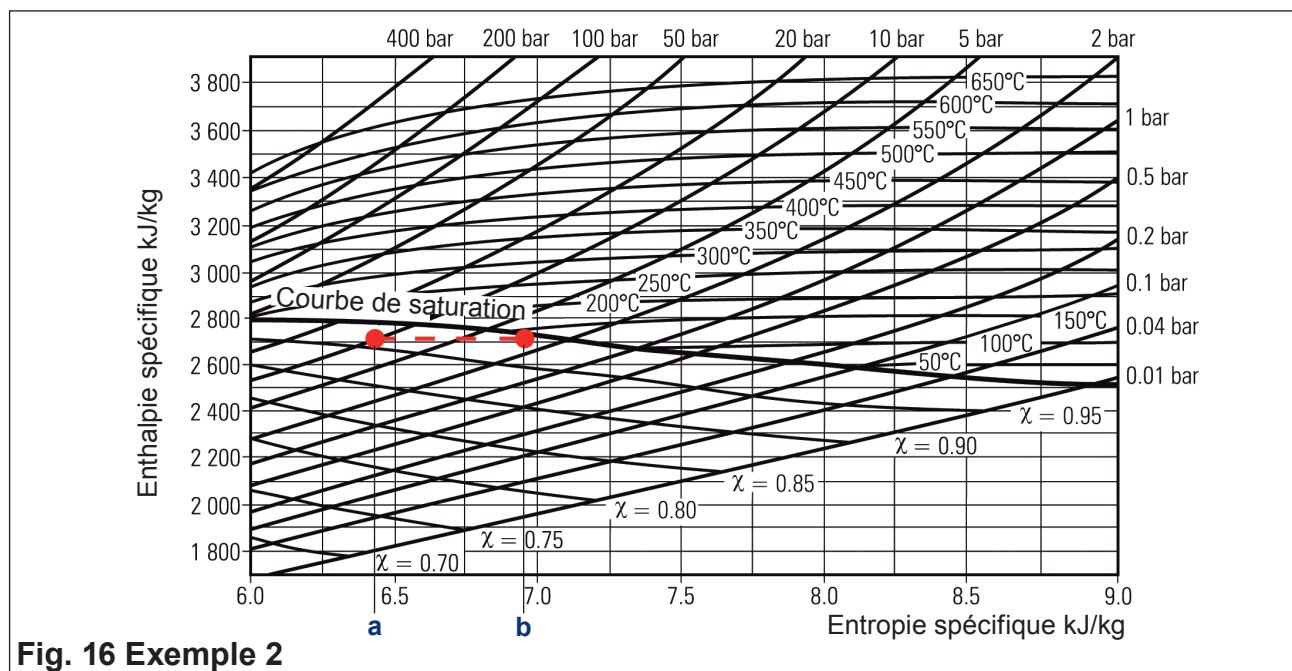


Fig. 16 Exemple 2

Chapitre 7

Condensat et vapeur de revaporisation

7.1 Condensat

Dans un système vapeur bien conçu, l'énergie thermique, qui autrement serait gaspillée, sera récupérée du condensat.

Lorsque la vapeur quitte la chaudière et entre dans le réseau de distribution, une partie de sa chaleur est perdue à cause des radiations, provoquant la condensation d'une partie de la vapeur.

Ce condensat doit être évacué parce qu'il a tendance à créer des coups de bélier et de la corrosion, sans parler de son impact négatif sur le transfert thermique au point final d'utilisation.

Le condensat du réseau de vapeur et des lignes de dérivation doit être récupéré, immédiatement avant les postes de régulation de pression ou de température via les purgeurs de vapeur. Cette énergie thermique peut alors être réutilisée.

7.2 Vapeur de revaporisation

La vapeur pour le chauffage ou le process est générée par la chaudière et est distribuée à une certaine pression supérieure à la pression atmosphérique.

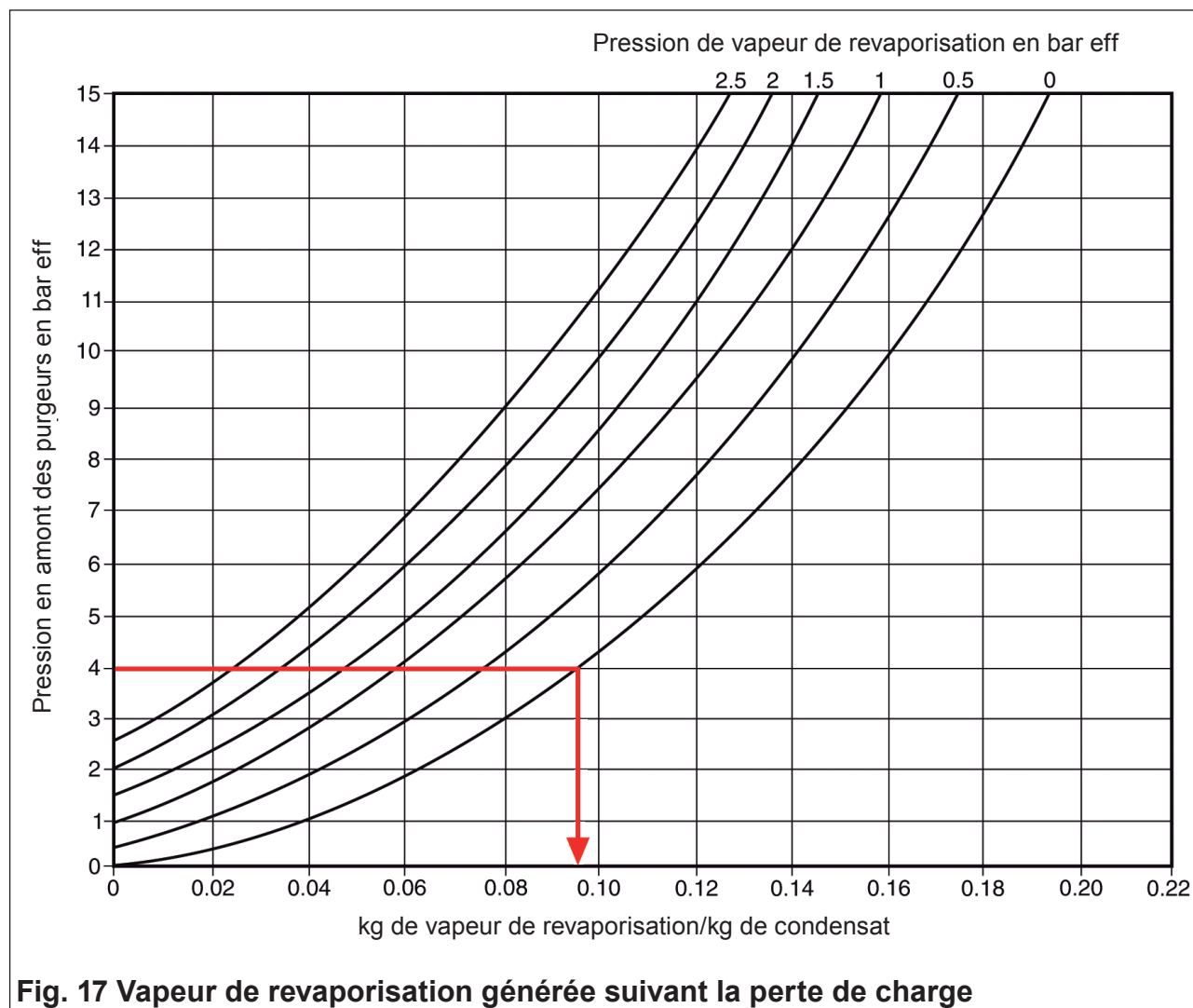
La table de la vapeur abrégée (Tableau 3) ci-dessous est un rappel que la température du condensat résultant de la condensation de la vapeur à une pression plus élevée que la pression atmosphérique sera plus élevée que la température au point d'ébullition à la pression atmosphérique.

Il s'ensuit donc que lorsque le condensat à haute pression est évacué par le purgeur dans une zone à pression plus faible, il ne peut pas exister complètement à l'état d'eau, car il y a un excès d'énergie entraînant la revaporisation d'une partie de l'eau en vapeur.

7.2.1 Tableau 3 - Table de la vapeur abrégée

Pression bar eff.	Température °C	Enthalpie en kJ/kg			Volume m³/kg
		Eau h _f	Evaporation h _{fg}	Vapeur h _g	
0	100	419	2 257	2 676	1,673
1	120	506	2 201	2 707	0,881
2	134	562	2 163	2 725	0,603
3	144	605	2 133	2 738	0,461
4	152	641	2 108	2 749	0,374
5	159	671	2 086	2 757	0,315
6	165	697	2 066	2 763	0,272
7	170	721	2 048	2 769	0,240

La quantité de vapeur de revaporisation évacuée dépend des pressions en amont et en aval du purgeur de vapeur, et peut être indiquée en fonction des différentes pressions par le diagramme classique de vapeur de revaporisation, présenté sur la Figure 17 ci-dessous.



7.2.2 Exemple

Le condensat d'une vapeur à 4 bar eff., se revaporisant à la pression atmosphérique, produira 9,8 % de vapeur de revaporisation. La vapeur de revaporisation libérée par le process est juste la même que la vapeur libérée lorsque la chaleur s'ajoute à l'eau saturée. Il est donc précieux de l'utiliser comme vapeur vive à cette pression.

Dans un système vapeur, le rendement global du système augmentera si la vapeur de revaporisation peut être séparée du condensat et utilisée sur des applications à basse pression. Chaque kilogramme de vapeur de revaporisation utilisé de cette manière est un kilogramme qui n'a pas à être fourni directement par la chaudière.

Chapitre 8

Tables de la vapeur

Pression bar	kPa	Température °C	Enthalpie Spécifique			Volume Spécifique de Vapeur m³/kg
			Eau (h _f) kJ/kg	Evaporation (h _{fg}) kJ/kg	Vapeur (h _g) kJ/kg	
absolue						
0,30	30,0	69,10	289,23	2336,1	2625,3	5,229
0,50	50,0	81,33	340,49	2305,4	2645,9	3,240
0,75	75,0	91,78	384,39	2278,6	2663,0	2,217
0,95	95,0	98,20	411,43	2261,8	2673,2	1,777
effective						
0	0	100,00	419,04	2257,0	2676,0	1,673
0,10	10,0	102,66	430,2	2250,2	2680,2	1,533
0,20	20,0	105,10	440,8	2243,4	2684,2	1,414
0,30	30,0	107,39	450,4	2237,2	2687,6	1,312
0,40	40,0	109,55	459,7	2231,3	2691,0	1,225
0,50	50,0	111,61	468,3	2225,6	2693,9	1,149
0,60	60,0	113,56	476,4	2220,4	2696,8	1,083
0,70	70,0	115,40	484,1	2215,4	2699,5	1,024
0,80	80,0	117,14	491,6	2210,5	2702,1	0,971
0,90	90,0	118,80	498,9	2205,6	2704,5	0,923
1,00	100,0	120,42	505,6	2201,1	2706,7	0,881
1,10	110,0	121,96	512,2	2197,0	2709,2	0,841
1,20	120,0	123,46	518,7	2192,8	2711,5	0,806
1,30	130,0	124,90	524,6	2188,7	2713,3	0,773
1,40	140,0	126,28	530,5	2184,8	2715,3	0,743
1,50	150,0	127,62	536,1	2181,0	2717,1	0,714
1,60	160,0	128,89	541,6	2177,3	2718,9	0,689
1,70	170,0	130,13	547,1	2173,7	2720,8	0,665
1,80	180,0	131,37	552,3	2170,1	2722,4	0,643
1,90	190,0	132,54	557,3	2166,7	2724,0	0,622
2,00	200,0	133,69	562,2	2163,3	2725,5	0,603
2,20	220,0	135,88	571,7	2156,9	2728,6	0,568
2,40	240,0	138,01	580,7	2150,7	2731,4	0,536
2,60	260,0	140,00	589,2	2144,7	2733,9	0,509
2,80	280,0	141,92	597,4	2139,0	2736,4	0,483
3,00	300,0	143,75	605,3	2133,4	2738,7	0,461
3,20	320,0	145,46	612,9	2128,1	2741,0	0,440
3,40	340,0	147,20	620,0	2122,9	2742,9	0,422
3,60	360,0	148,84	627,1	2117,8	2744,9	0,405
3,80	380,0	150,44	634,0	2112,9	2746,9	0,389
4,00	400,0	151,96	640,7	2108,1	2748,8	0,374
4,50	450,0	155,55	656,3	2096,7	2753,0	0,342
5,00	500,0	158,92	670,9	2086,0	2756,9	0,315
5,50	550,0	162,08	684,6	2075,7	2760,3	0,292
6,00	600,0	165,04	697,5	2066,0	2763,5	0,272
6,50	650,0	167,83	709,7	2056,8	2766,5	0,255
7,00	700,0	170,50	721,4	2047,7	2769,1	0,240
7,50	750,0	173,02	732,5	2039,2	2771,7	0,227
8,00	800,0	175,43	743,1	2030,9	2774,0	0,215
8,50	850,0	177,75	753,3	2022,9	2776,2	0,204
9,00	900,0	179,97	763,0	2015,1	2778,1	0,194
9,50	950,0	182,10	772,5	2007,5	2780,0	0,185
10,00	1000,0	184,13	781,6	2000,1	2781,7	0,177
10,50	1050,0	186,05	790,1	1993,0	2783,3	0,171
11,00	1100,0	188,02	798,8	1986,0	2784,8	0,163
11,50	1150,0	189,82	807,1	1979,1	2786,3	0,157
12,00	1200,0	191,68	815,1	1972,5	2787,6	0,151
12,50	1250,0	193,43	822,9	1965,4	2788,8	0,146

Pression bar	kPa	Température °C	Enthalpie Spécifique			Volume Spécifique de Vapeur m³/kg
			Eau (h _f) kJ/kg	Evaporation (h _{fg}) kJ/kg	Vapeur (h _g) kJ/kg	
13,00	1300,0	195,10	830,4	1959,6	2790,0	0,141
13,50	1350,0	196,62	837,9	1953,2	2791,1	0,136
14,00	1400,0	198,35	845,1	1947,1	2792,2	0,132
14,50	1450,0	199,92	852,1	1941,0	2793,1	0,128
15,00	1500,0	201,45	859,0	1935,0	2794,0	0,124
15,50	1550,0	202,92	865,7	1928,8	2794,9	0,119
16,00	1600,0	204,38	872,3	1923,4	2795,7	0,117
17,00	1700,0	207,17	885,0	1912,1	2797,1	0,110
18,00	1800,0	209,90	897,2	1901,3	2798,5	0,105
19,00	1900,0	212,47	909,0	1890,5	2799,5	0,100
20,00	2000,0	214,96	920,3	1880,2	2800,5	0,0949
21,00	2100,0	217,35	931,3	1870,1	2801,4	0,0906
22,00	2200,0	219,65	941,9	1860,1	2802,0	0,0868
23,00	2300,0	221,85	952,2	1850,4	2802,6	0,0832
24,00	2400,0	224,02	962,2	1840,9	2803,1	0,0797
25,00	2500,0	226,12	972,1	1831,4	2803,5	0,0768
26,00	2600,0	228,15	981,6	1822,2	2803,8	0,0740
27,00	2700,0	230,14	990,7	1813,3	2804,0	0,0714
28,00	2800,0	232,05	999,7	1804,4	2804,1	0,0689
29,00	2900,0	233,93	1008,6	1795,6	2804,2	0,0666
30,00	3000,0	235,78	1017,0	1787,0	2804,1	0,0645
31,00	3100,0	237,55	1025,6	1778,5	2804,1	0,0625
32,00	3200,0	239,28	1033,9	1770,0	2803,9	0,0605
33,00	3300,0	240,97	1041,9	1761,8	2803,7	0,0587
34,00	3400,0	242,63	1049,7	1753,8	2805,5	0,0571
35,00	3500,0	244,26	1057,7	1745,5	2803,2	0,0554
36,00	3600,0	245,86	1065,7	1737,2	2802,9	0,0539
37,00	3700,0	247,42	1072,9	1729,5	2802,4	0,0524
38,00	3800,0	248,95	1080,3	1721,6	2801,9	0,0510
39,00	3900,0	250,42	1087,4	1714,1	2801,5	0,0498
40,00	4000,0	251,94	1094,6	1706,3	2800,9	0,0485
41,00	4100,0	253,34	1101,6	1698,3	2799,9	0,0473
42,00	4200,0	254,74	1108,6	1691,2	2799,8	0,0461
43,00	4300,0	256,12	1115,4	1683,7	2799,1	0,0451
44,00	4400,0	257,50	1122,1	1676,2	2798,3	0,0441
45,00	4500,0	258,82	1228,7	1668,9	2797,6	0,0431
46,00	4600,0	260,13	1135,3	1666,6	2796,9	0,0421
47,00	4700,0	261,43	1142,2	1654,4	2796,6	0,0412
48,00	4800,0	262,73	1148,1	1647,1	2795,2	0,0403
49,00	4900,0	264,00	1154,5	1639,9	2794,4	0,0394
50,00	5000,0	265,26	1160,8	1632,8	2793,6	0,0386
51,00	5100,0	266,45	1166,6	1626,9	2792,6	0,0378
52,00	5200,0	267,67	1172,6	1619,0	2791,6	0,0371
53,00	5300,0	268,84	1178,7	1612,0	2790,7	0,0364
54,00	5400,0	270,02	1184,6	1605,1	2789,7	0,0357
55,00	5500,0	271,20	1190,5	1598,2	2788,7	0,0350
56,00	5600,0	272,33	1196,3	1591,3	2787,6	0,0343
57,00	5700,0	273,45	1202,1	1584,5	2786,6	0,0337
58,00	5800,0	274,55	1207,8	1577,7	2785,5	0,0331
59,00	5900,0	275,65	1213,4	1571,0	2784,4	0,0325
60,00	6000,0	276,73	1218,9	1564,4	2783,3	0,0319
61,00	6100,0	277,80	1224,5	1557,6	2782,1	0,0314
62,00	6200,0	278,85	1230,0	1550,9	2780,9	0,0308
63,00	6300,0	279,89	1235,4	1544,3	2779,7	0,0303
64,00	6400,0	280,92	1240,8	1537,3	2778,5	0,0298
65,00	6500,0	281,95	1246,1	1531,2	2777,3	0,0293
66,00	6600,0	282,95	1251,4	1524,7	2776,1	0,0288
67,00	6700,0	283,95	1256,7	1518,1	2774,8	0,0283
68,00	6800,0	284,93	1261,9	1511,6	2773,5	0,0278
69,00	6900,0	285,90	1267,0	1501,1	2772,1	0,0274

Pression bar	kPa	Température °C	Enthalpie Spécifique			Volume Spécifique de Vapeur m³/kg
			Eau (h _f) kJ/kg	Evaporation (h _{fg}) kJ/kg	Vapeur (h _g) kJ/kg	
70,00	7000,0	286,85	1272,1	1498,7	2770,8	0,0270
71,00	7100,0	287,80	1277,3	1492,2	2769,5	0,0266
72,00	7200,0	288,75	1282,3	1485,8	2768,1	0,0262
73,00	7300,0	289,69	1287,3	1479,4	2766,7	0,0258
74,00	7400,0	290,60	1292,3	1473,0	2765,3	0,0254
75,00	7500,0	291,51	1297,2	1466,6	2763,8	0,0250
76,00	7600,0	292,41	1302,3	1460,2	2762,5	0,0246
77,00	7700,0	293,91	1307,0	1453,9	2760,9	0,0242
78,00	7800,0	294,20	1311,9	1447,6	2759,5	0,0239
79,00	7900,0	295,10	1316,7	1441,3	2758,0	0,0236
80,00	8000,0	295,96	1321,5	1435,0	2756,5	0,0233
81,00	8100,0	296,81	1326,2	1428,7	2754,9	0,0229
82,00	8200,0	297,66	1330,9	1422,5	2753,4	0,0226
83,00	8300,0	298,50	1335,7	1416,2	2751,9	0,0223
84,00	8400,0	299,35	1340,3	1410,0	2750,3	0,0220
85,00	8500,0	300,20	1345,0	1403,8	2748,8	0,0217
86,00	8600,0	301,00	1349,6	1397,6	2747,2	0,0214
87,00	8700,0	301,81	1354,2	1391,3	2745,5	0,0211
88,00	8800,0	302,61	1358,8	1385,2	2744,0	0,0208
89,00	8900,0	303,41	1363,3	1379,0	2742,3	0,0205
90,00	9000,0	304,20	1367,8	1372,7	2740,5	0,0202
92,00	9200,0	305,77	1376,8	1360,3	2737,1	0,0197
94,00	9400,0	307,24	1385,7	1348,0	2733,7	0,0192
96,00	9600,0	308,83	1394,5	1335,7	2730,2	0,0187
98,00	9800,0	310,32	1403,2	1323,3	2726,5	0,0183
100,00	10000,0	311,79	1411,9	1310,9	2722,8	0,0178
102,00	10200,0	313,24	1420,5	1298,7	2719,2	0,0174
104,00	10400,0	314,67	1429,0	1286,3	2715,3	0,0170
106,00	10600,0	316,08	1437,5	1274,0	2711,5	0,0166
108,00	10800,0	317,46	1445,9	1261,7	2707,6	0,0162
110,00	11000,0	318,83	1454,3	1249,3	2703,6	0,0158
112,00	11200,0	320,17	1462,6	1237,0	2699,6	0,0154
114,00	11400,0	321,50	1470,8	1224,6	2695,4	0,0150
116,00	11600,0	322,81	1479,0	1212,2	2691,2	0,0147
118,00	11800,0	324,10	1487,2	1199,8	2687,0	0,0144
120,00	12000,0	325,38	1495,4	1187,3	2682,7	0,0141



BANQUE MONDIALE

Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie

3 rue Chott Mariem Montplaisir 1073 Tunis – B.P. 213
 Tél : [216] 71 906 900 – [216] 71 908 305 - Fax : [216] 71 904 624
 Direction de l'Efficacité Energétique dans l'Industrie
 E-mail : ugp_pee@anme.nat.tn
 Site web : www.anme.nat.tn

