

Convection Thermique Lors Du Changement De Phase

Le transfert de chaleur associé à un changement de phase (ébullition d'un liquide ou condensation d'une vapeur) conduit en général à des coefficients d'échange très élevés. Pour cette raison, les applications industrielles de systèmes thermiques exploitant ces phénomènes sont nombreuses : condenseurs, chaudières, réchauffeurs...

Convection lors de la condensation

La condensation intervient quand une vapeur à température et pression données rentre en contact avec une paroi dont la température est inférieure à la température de saturation de vapeur T_{sat} pour cette pression. Il en résulte qu'une certaine quantité de masse de liquide se dépose sur la surface froide. Pendant ce phénomène, la chaleur latente de vaporisation est dégagée et transférée vers la paroi.

Les interactions liquides – paroi solide sont à la base du type de condensation. Comme cela est représenté sur la figure 1, nous pouvons distinguer :

- la condensation en film continu, quand le liquide mouille la surface et sépare la vapeur de la paroi solide. Du fait de la faible conductivité thermique des liquides, cette séparation diminue en général les échanges thermiques.
- la condensation en gouttelettes, que l'on observe sur des surfaces propres, sans contaminations, souvent recouvertes de substances lipophiles (téflon, or). La formation de gouttes intervient quand la tension superficielle du liquide est suffisamment élevée pour que celui-ci ne mouille pas la surface. La taille des gouttelettes augmente durant le processus. Quand elle atteint une dimension critique elles se détachent libérant ainsi la surface solide de la barrière thermique.

ment élevée pour que celui-ci ne mouille pas la surface. La taille des gouttelettes augmente durant le processus. Quand elle atteint une dimension critique elles se détachent libérant ainsi la surface solide de la barrière thermique.

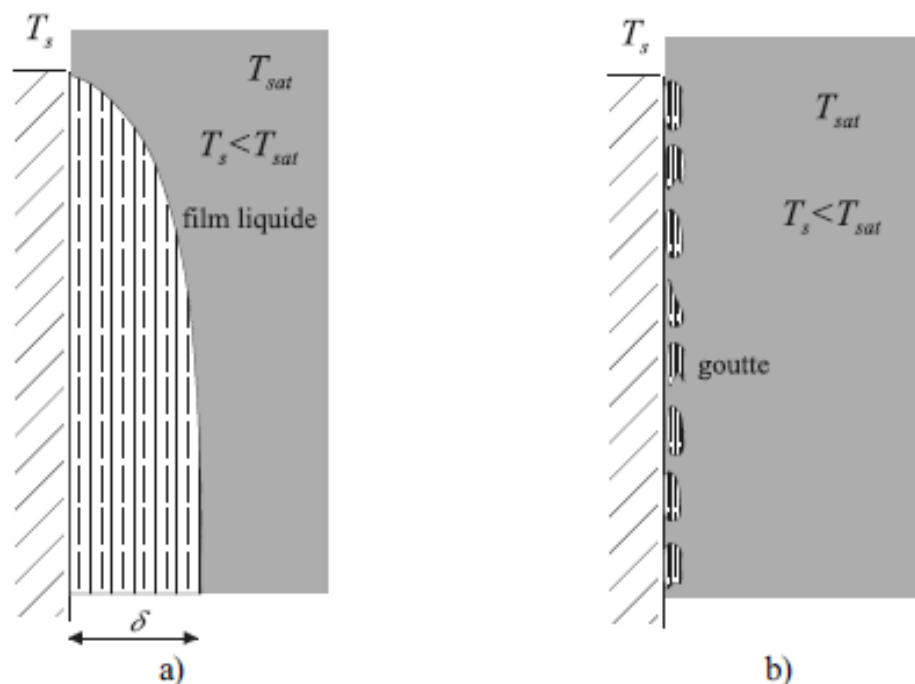


Figure 1 : Deux types de condensation : a) en film ; b) en gouttelettes

La condensation en gouttelettes favorise donc l'échange de chaleur et est recherchée dans les applications industrielles. Cependant, il est très difficile de maintenir les conditions de condensation en gouttes en pratique. En effet, les surfaces se dégradent, la rugosité augmente et en général cela conduit à la condensation en film. Pour cela la plupart des travaux concernant l'échange convectif de chaleur en condensation sont consacrés à la condensation en film.

Coefficient d'échange convectif pour la condensation en film sur une paroi verticale

- *Film laminaire*

Le coefficient d'échange h a été relié à divers paramètres physiques intervenant dans la condensation en film sur une paroi par Nusselt en 1916. Ses analyses théoriques sont basées sur les hypothèses suivantes :

- écoulement laminaire du film et propriétés constantes du fluide
- la vapeur est pure à sa température de saturation et il n'y a pas de gradient de température au sein du gaz ; le transfert se fait seulement par condensation sur la paroi
- le gradient de température dans le film est constant, le transfert de chaleur se fait par conduction seule

Nusselt a établi l'expression du coefficient d'échange moyen :

$$\bar{h}_L = 0,943 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) \lambda_l^3 \Delta H}{\mu_l (T_{sat} - T_s) L} \right]^{1/4} \quad (1)$$

Avec :

- g : accélération de la pesanteur
- ρ_l : masse volumique de la phase liquide
- ρ_v : masse volumique de la phase vapeur
- λ_l : conductivité thermique de la phase liquide
- μ_l : viscosité dynamique de la phase liquide
- $\Delta H = H_g + 0,68 C_{p,l} (T_{sat} - T_s)$ où H_g est la chaleur latente de vaporisation et $C_{p,l}$ est la chaleur spécifique du condensat.
- L : longueur
- T_{sat} : température de saturation de la vapeur
- T_s : température de la paroi

Les propriétés du liquide sont déterminées à la température moyenne $T_f = (T_{sat} + T_s) / 2$ et ΔH est calculé à la température T_{sat} .

Cette expression peut être aussi appliquée pour les surfaces inclinées. La valeur g doit être remplacée dans ce cas par $g \cos \vartheta$, où ϑ est l'angle entre la surface et la verticale. Cependant il faut l'utiliser avec précaution pour de grandes valeurs de ϑ .

Le régime d'écoulement du film est considéré comme laminaire jusqu'à la valeur critique du nombre de Reynolds $Re_\delta = 1\ 800$. Ce nombre est calculé à partir de la vitesse moyenne d'écoulement du film \bar{u}_l , de son épaisseur δ et de la viscosité cinématique ν_l :

$$Re_\delta = \frac{\bar{u}_l \delta}{\nu_l} \quad (2)$$

- *Film turbulent*

L'écoulement dans le film devient turbulent quand $Re_\delta > 1\,800$. Ce régime augmente les échanges au sein du film. Le coefficient d'échange est calculé à partir de la corrélation :

$$\frac{\bar{h}_L (v_l^2/g)^{1/3}}{\lambda_l} = \frac{Re_\delta}{8\,750 + 58Pr^{-0,5} (Re_\delta^{0,75} - 253)} \quad (3)$$

Film sur un tube horizontal

En pratique on rencontre souvent la condensation sur la surface extérieure des tubes (échangeurs de chaleur). Pour le calcul de ce type de système, les analyses de Nusselt

conduisent à un coefficient moyen :

$$\bar{h}_D = 0,729 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)\lambda_l^3\Delta H}{\mu_l(T_{sat} - T_s) D n} \right]^{1/4} \quad (4)$$

D est le diamètre du tube et n le nombre de tubes (figure 2).

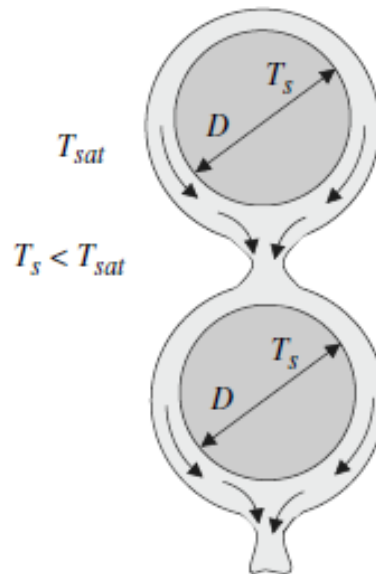


Figure 2 : Condensation sur une rangée de tubes

Film à l'intérieur d'un tube horizontal

Les conditions d'écoulement du film à l'intérieur sont complexes et dépendent beaucoup de la vitesse d'écoulement de la vapeur. Pour de faibles vitesses de vapeur :

$$Re_D = \frac{\bar{u}_l D}{\nu_l} < 35\,000$$

Le coefficient d'échange moyen est :

$$\bar{h}_D = 0,555 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) \lambda_l^3 \Delta H}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D n} \right]^{1/4} \quad (5)$$

D désigne le diamètre interne du tube (figure 3)

La condensation en gouttes conduit à des coefficients d'échange d'un ordre de grandeur plus important que pour la convection en film. Pour ce type de condensation

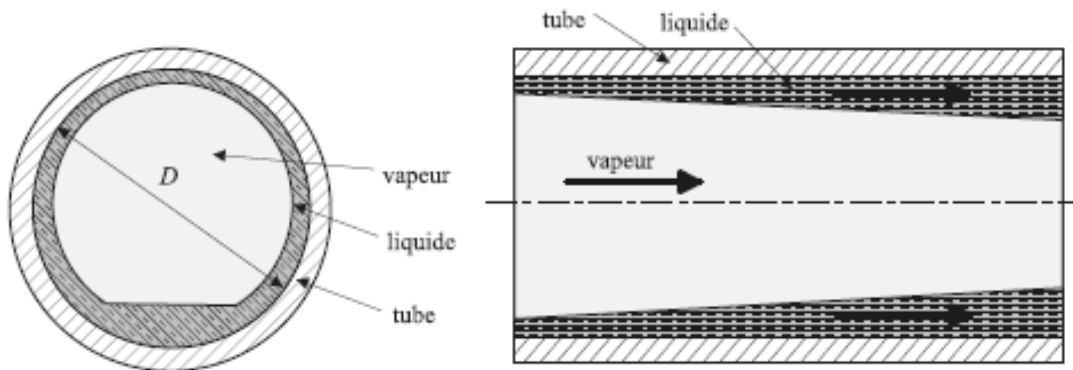


Figure 3 Condensation dans le tube

a) faible vitesse d'écoulement de la vapeur : le film s'écoule sur les parois du tube perpendiculairement à l'axe du tube et forme un ruisseau qui évacue le condensat ;
 b) grande vitesse d'écoulement de la vapeur : une couche circulaire de liquide se forme sur tout le périmètre du tube et son épaisseur augmente avec la distance d'écoulement.

on trouve dans la littérature les expressions le coefficient d'échange moyen \bar{h}_g en $[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$ égal à :

$$\bar{h}_g = 255\,510, \text{ pour } T_{sat} > 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Et :

$$\bar{h}_g = 51\,104 + 2\,044 T_{sat}, \text{ pour } 25^\circ\text{C} < T_{sat} < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Convection lors de l'ébullition

L'ébullition est le processus de formation de vapeur d'un liquide à sa température de saturation pour une pression donnée. Elle se caractérise par la chaleur de vaporisation. Le plus souvent, la chaleur de vaporisation est apportée au liquide par une surface solide, néanmoins on peut rencontrer les cas où le liquide est chauffé par des sources volumiques de chaleur telles que le rayonnement, l'induction ou les micro-ondes.

L'échange thermique associé à l'ébullition est caractérisé par des coefficients d'échange importants et de hauts flux de chaleur pour une différence de température entre la température de saturation du liquide T_{sat} et la température de la paroi solide T_s . L'échange de chaleur en ébullition est utilisé pour la production de vapeur dans les centrales électriques ou le chauffage. Il est aussi largement exploité dans des systèmes nécessitant un refroidissement intense, comme par exemple : les réacteurs nucléaires, les turboréacteurs de fusées etc.

On distingue deux types d'ébullition :

- ébullition surfacique, où la vapeur se forme à la surface chauffée
- ébullition en volume, où la vapeur peut se former dans l'ensemble de volume de liquide à la température de saturation

En fonction du type d'écoulement du fluide, on peut aussi avoir l'ébullition en convection naturelle pour un fluide immobile ou l'ébullition en convection forcée pour un fluide en écoulement dans un conduit.

La manière dont la vapeur se forme à la surface chauffée dépend de la différence de température $T_s - T_{sat}$. La figure 4 représente la densité de flux de chaleur échangé en fonction de la différence susmentionnée pour l'eau à la pression normale.

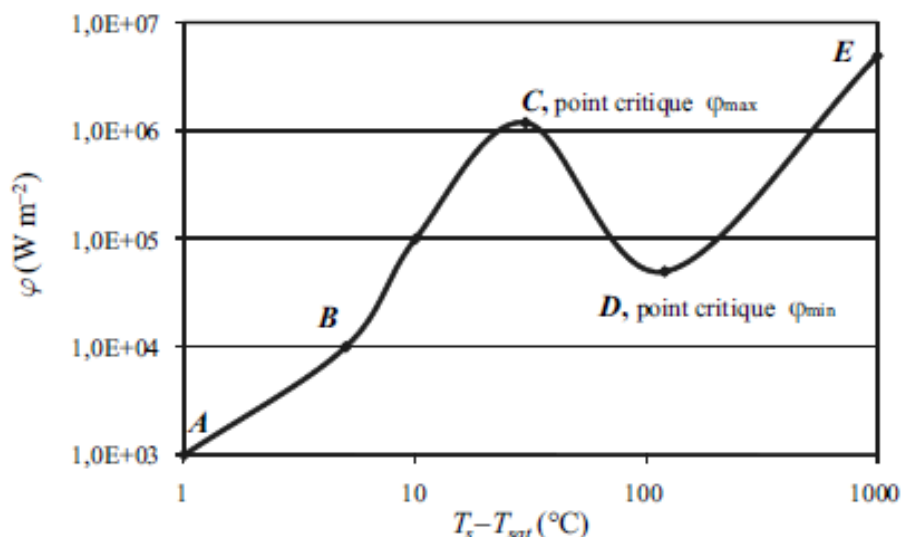


Figure 4 : Densité de flux échangé pour l'eau en fonction de la différence $T_s - T_{sat}$

- **Ébullition en convection libre (zone AB).** Dans la plage AB , $T_s - T_{sat} = 0 \div 5^\circ\text{C}$ la chaleur est transportée uniquement par convection naturelle dans le liquide. La vapeur se forme seulement à la surface libre du liquide en contact avec l'air. Le coefficient d'échange est proportionnel à $(T_s - T_{sat})^{0,25}$ et le flux échangé est proportionnel à $(T_s - T_{sat})^{1,25}$.
- **Ébullition nucléée (zone BC).** Dans la plage BC , $T_s - T_{sat} = 5 \div 30^\circ\text{C}$ des bulles de vapeur se forment à la surface chauffée. Elles deviennent de plus en plus grandes et s'évacuent vers la surface du liquide. Le coefficient d'échange est proportionnel à $(T_s - T_{sat})^2$ et donc le flux transmis à $(T_s - T_{sat})^3$. À $T_s - T_{sat} = 30^\circ\text{C}$ la densité de flux ($\varphi = \bar{h}(T_s - T_{sat})$) atteint son maximum, appelé point critique d'ébullition (C).
- **Ébullition instable (zone CD).** C'est la zone instable. Le coefficient et le flux diminuent brusquement. La densité de flux atteint le minimum au point critique (D).
- **Ébullition pelliculaire (zone DE).** Toute la surface chauffée est recouverte de mince film de vapeur. Le transfert de chaleur se fait au départ essentiellement

par conduction. Avec l'augmentation de température le phénomène de rayonnement s'ajoute à la conduction ce qui conduit à l'élévation du flux transmis. L'augmentation de température dans cette zone peut provoquer la fusion de la paroi chauffée.

Coefficient d'échange en ébullition

L'évolution de la courbe d'ébullition indique qu'il existe une multitude de corrélations pour caractériser l'échange de chaleur en ébullition. Pour l'ébullition en convection naturelle les corrélations présentées précédemment pour ce mode de convection peuvent être utilisées.

• *Ébullition nucléée*

L'expression suivante pour la densité de flux est proposée dans la littérature pour les calculs en ébullition nucléée :

$$\varphi = \mu_l \Delta H \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l}(T_s - T_{sat})}{C_{s,f} \Delta H Pr_l^n} \right)^3 \quad (6)$$

Dans cette expression, les index l , v , correspondent respectivement au liquide et à la vapeur saturée. σ est la tension superficielle entre la vapeur et le liquide. Les coefficients $C_{s,f}$ et n dépendent de l'interface liquide-solide. Quelques valeurs de ces coefficients sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 Quelques constantes de l'expression de flux échangé en ébullition nucléée

Interface liquide - solide	$C_{s,f}$	n
eau – cuivre poli	0,010 3	1
eau – acier poli	0,006 0	1
eau – nickel	0,006 0	1
benzène – chrome	0,101	1,7
éthanol – chrome	0,002 7	1,7

Densité de flux maximum La densité de flux au point critique C est :

$$\varphi_{\max} = 0,149 \Delta H \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \quad (7)$$

Densité de flux minimum La densité de flux au point critique D est :

$$\varphi_{\min} = 0,09 \rho_v \Delta H \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} \quad (8)$$

• *Ébullition en film*

L'ébullition en film stable est semblable à la condensation laminaire. Le coefficient d'échange moyen est :

$$\bar{h}_D = \beta_1 \left[\frac{g \rho_v (\rho_l - \rho_v) \lambda_v^3 \Delta H}{\mu_v (T_s - T_{sat}) D} \right]^{1/4} \quad (9)$$

Le nombre de Nusselt est défini par :

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}_D D}{\lambda_v} = \beta_1 \left[\frac{g \rho_v (\rho_l - \rho_v)^3 \Delta H D^3}{\mu_v \lambda_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4}$$

Avec $0,729 < \beta_1 < 1,029$ selon la forme de la surface chauffée (cylindre, sphère, plaque) et D est la dimension caractéristique (diamètre, longueur).

• *Ébullition en convection forcée*

Deux relations sont proposées pour ce type d'échange :

- faible vitesse d'écoulement :

$$\frac{\varphi_{\max}}{\rho_v \Delta H u} = \frac{1}{\pi} \left[1 + \left(\frac{4}{We_D} \right)^{1/3} \right] \quad (10)$$

- grande vitesse d'écoulement

$$\frac{\varphi_{\max}}{\rho_v \Delta H u} = \frac{(\rho_l / \rho_v)^{3/4}}{169 \pi} + \frac{(\rho_l / \rho_v)^{1/2}}{19,2 \pi We_D} \quad (11)$$

Dans ces relations, le nombre We_D est appelé le nombre de Weber :

$$We_D \equiv \frac{\rho_v u^2 D}{\sigma} \quad (12)$$

Il représente le rapport des forces d'inertie et des forces de tension superficielle. Le régime de faible et grande vitesse est déterminé par :

$$\frac{\varphi_{\max}}{\rho_v \Delta H u} < \left[\left(\frac{0,275}{\pi} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1 \right], \text{ pour les faibles vitesses d'écoulement.}$$

$$\frac{\varphi_{\max}}{\rho_v \Delta H u} > \left[\left(\frac{0,275}{\pi} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1 \right], \text{ pour les grandes vitesses d'écoulement.}$$