

3- Transfert lors de Changements de phase

3.1- Introduction

Le transfert de chaleur lors du changement de phase prend une place considérable dans les processus industriels vu les quantités de chaleur mises en jeu. Nous allons considérer, dans ce chapitre, les phénomènes de transfert qui ont lieu pendant l'ébullition (ou vaporisation) d'un liquide ainsi que lors de la condensation d'une vapeur.

En plus, des grandeurs entrant en jeu dans l'étude de la convection, les phénomènes de transfert avec changement de phase font intervenir de nouvelles variables caractérisant, soit le passage d'un fluide d'une phase à une autre, soit une propriété de frontière entre ces deux phases.

En général, les formules utilisées en transfert avec changement de phases sont très compliquées puisque le phénomène fait intervenir un nombre important de paramètres. Dans ce contexte, nous n'allons donc nous intéresser qu'à la description des phénomènes mis en jeu.

En premier lieu, commençons par quelques définitions qui seront utiles par la suite.

3.1.1- Pression de vapeur saturante, température de saturation

Si l'on enferme un liquide et sa vapeur dans une enceinte préalablement vidée dont on contrôle la pression ou la température, on constate que, pour chaque température, il existe une valeur de la pression à laquelle les phases liquide et vapeur coexistent en équilibre. Cette pression notée P_{sat} , s'appelle *pression de vapeur saturante* ou encore *tension de vapeur saturante*. C'est la pression maximale de vapeur à laquelle le liquide peut se vaporiser dans l'enceinte, à une température donnée. La vapeur en équilibre avec le liquide qui lui a donné naissance porte le nom de vapeur saturante.

Réciproquement, si l'on fixe la valeur de la pression, (à condition que $P < P_{cr}$), l'équilibre entre les phases liquide et vapeur a lieu pour une valeur de la température, notée T_{sat} appelée *température de saturation* ou *température d'ébullition* (Fig.3.1).

* On note qu'il existe des formules empiriques et des tables fournissant la relation $P_{sat} = f(T)$ pour un certain nombre de fluides.

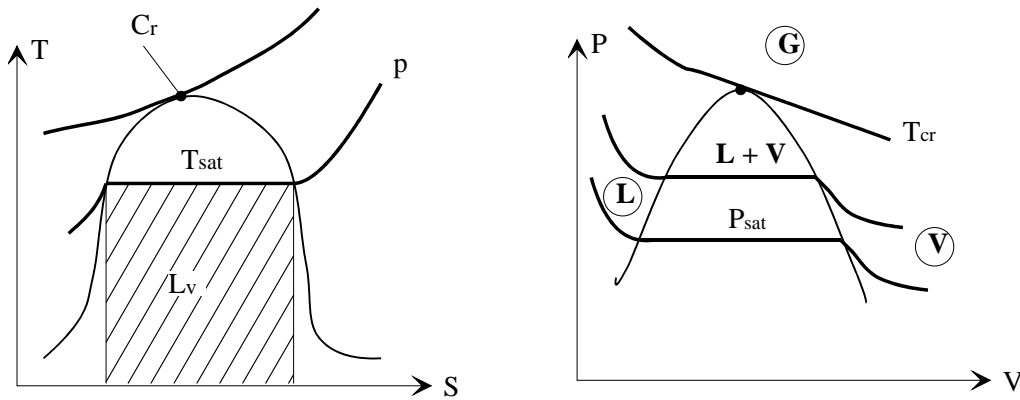


Fig.3.1-Pression et température de saturation.

3.1.2- Chaleur latente de vaporisation

La chaleur latente de vaporisation notée L_v est la quantité d'énergie qu'il faut fournir à l'unité de masse d'un corps pour faire passer celui-ci de l'état liquide à l'état gazeux en restant à température constante (pour l'eau à 100 °C par exemple, $L_v = 2250$ kJ/kg). La même quantité d'énergie est libérée par le fluide dans la transformation inverse (condensation).

3.1.3- Tension superficielle

La tension superficielle notée σ (ou l'énergie superficielle) résulte des phénomènes d'attraction moléculaire au sein d'un liquide. Elle est égale à l'énergie qu'il faut dépenser pour accroître d'une unité de surface libre du liquide, en transférant des molécules de l'intérieur du liquide vers la surface. Pour l'eau à 100 °C en contact avec l'air: $\sigma = 0.059$ N/m.

3.2- Transfert de chaleur lors de l'ébullition

Pendant longtemps, l'ébullition d'un corps pur n'a été remarquée que pour son passage de l'état liquide à l'état vapeur (production de vapeur dans les machines thermiques par exemple)

ainsi que pour la température à laquelle se produisait ce phénomène. Du point de vue des échanges thermiques, les coefficients d'échange obtenus par convection étaient considérés comme suffisants et les augmentations de puissance échangées entre un fluide et une paroi se faisaient de préférence par accroissement de la surface de la paroi. Or, depuis quelques décennies, de nouvelles techniques ont imposé l'extraction de très grandes puissances calorifiques à partir de surfaces réduites (applications nucléaires, aérospatiales, électronique de puissance...etc.). La seule possibilité était donc l'augmentation du coefficient d'échange, non par la vitesse du fluide, car celle-ci engendrait très vite des pertes de charge inadmissibles, mais par l'amélioration du processus de d'échange lui-même, et l'ébullition est un moyen très simple qui procure cette amélioration, bien qu'elle côtoyait des limites dangereuses.

3.2.1- Mécanisme de l'amélioration du transfert

Dans le but de simplifier et en raison de son importance, nous allons considérer uniquement le cas de l'ébullition de l'eau.

La première idée qui vient à l'esprit est que cette amélioration est liée à la valeur élevée de la chaleur latente L_v . Or, en fait, les observations et le calcul (volume et nombre de bulles) montrent que la part due à L_v ne présente que quelques pour-cent de l'énergie thermique échangée. L'amélioration du coefficient d'échange est essentiellement due à un effet local de microconvection induit par les bulles. En fonction de la fréquence de leur naissance, de la vitesse d'augmentation de leur volume et leur départ de la paroi, ces bulles jouent un rôle d'agitateurs détruisant la couche limite thermique située au contact de la paroi, et l'on sait que c'est justement cette couche qui présente la principale résistance au passage de la chaleur entre une paroi solide et un fluide.

Ce schéma est assez simpliste car le phénomène de l'ébullition ne se limite pas à la seule émission de bulles individuelles et il existe un certain nombre de "*régimes d'ébullition*" où d'autres mécanismes d'échange entrent en jeu. Vu les difficultés dues au nombre élevé de variables et pour arriver à comprendre correctement le phénomène, les études expérimentales font intervenir des techniques raffinées: prises de vues cinématographiques, méthodes optiques de visualisation (strioscopie, rayons X) ou de mesure (interférométrie); Thermométrie par microthermocouples, ...etc.

La théorie élémentaire de la formation des bulles suppose que, sur les parois chauffées sur lesquelles se produit l'ébullition, se trouvent des discontinuités préexistantes (petits trous contenant de l'air piégé, défauts locaux de mouillabilité, ...etc) qui servent de "germes" favorisant la naissance des bulles. Ces points privilégiés s'appellent "sites" et leur nombre croît (on dit qu'ils s'amorcent) avec la différence entre la température de paroi et celle d'ébullition ($T_p - T_{sat}$). Cette différence doit être d'au moins quelques degrés pour que l'ébullition puisse se déclencher.

3.2.2- Ebullition en eau stagnante (pool boiling)

Pour décrire le phénomène (appelé encore ébullition en vase) d'une façon simple, prenons le cas de l'eau qui bout dans une enceinte. Par exemple, un élément chauffant plongé, dans de l'eau et porté à une température supérieure à celle de l'ébullition. Deux cas seront à considérer, suivant que la masse d'eau dans son ensemble aura été ou non portée au préalable à la température d'ébullition. On supposera que l'eau est pure et désaérée.

Cette étude permettra de relier la densité de flux calorifique ϕ , transmise par l'élément chauffant, à la différence de température entre la paroi de cet élément et l'eau: ($T_p - T_\infty$). En fait, la température de l'eau restant pratiquement constante pendant l'ébullition, on peut remplacer T_∞ par T_{sat} et l'on posera $\Delta T_{sat} = T_p - T_{sat}$.

- Régimes d'ébullition, courbes de Nukiyama:

La relation entre la densité de flux et ΔT_{sat} est donnée par la courbe ci-dessous (Fig.3.2) établie par Nukiyama en 1934.

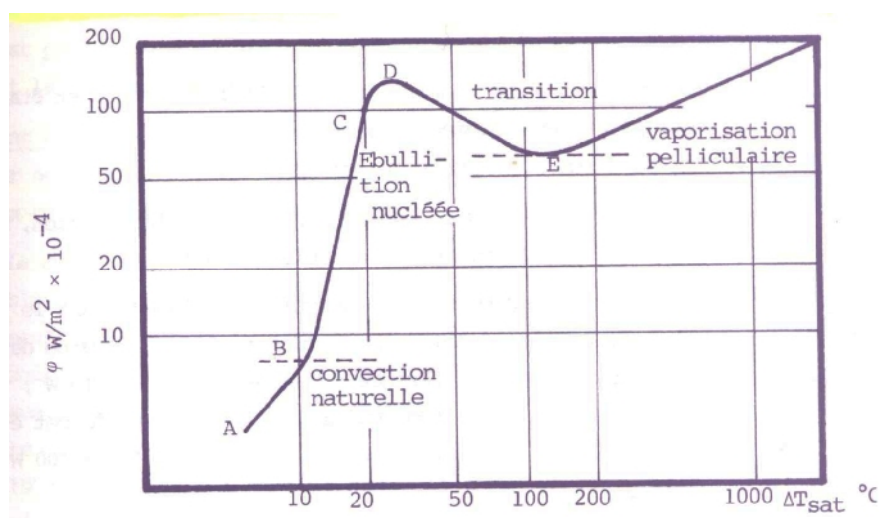


Fig.3.2- Courbe de Nukiyama.

Zone AB: Il n'y a pas encore de naissance de bulles bien que T_p dépasse de quelques degrés T_{sat} car une certaine surchauffe est nécessaire pour "amorcer les germes". L'échange entre la paroi chauffante et l'eau se fait par convection naturelle.

Zone BC: Les bulles montent en colonne à partir de points isolés de la paroi (les "sites" ou "nucleus" en anglais) avec une fréquence de l'ordre de 100 par seconde, à la pression atmosphérique. Cette zone est dite d'ébullition nucléée (nucleate boiling) et la relation entre ϕ et ΔT_{sat} est de la forme:

$$\phi = h(\Delta T_{sat})^n \quad (3.1)$$

h dépendant de la nature du fluide, de la pression, de la géométrie et de la nature et de l'état de surface de l'élément chauffant.

$3 < n < 4$ pour l'eau à la pression atmosphérique.

On voit immédiatement le gain énorme apporté par l'ébullition.

Zone CD: Les bulles, devenant de plus en plus nombreuses, isolent la paroi par un manteau de vapeur continu et empêchent son irrigation par le liquide. L'évacuation de la chaleur se fait principalement sous forme de chaleur latente de vaporisation. L'accroissement du ΔT_{sat} n'est plus accompagné d'un accroissement du flux transmis, ce que traduit la courbe de la zone CD.

Point D: Le manteau de vapeur isole complètement la paroi et la chaleur ne peut plus se transmettre que par l'intermédiaire de la vapeur. Deux cas peuvent se produire:

- Dans le cas d'un flux imposé, le processus d'échange étant incapable d'assurer l'évacuation de la chaleur, la température de l'élément chauffant va croître brutalement. Ce point est appelé *point d'échauffement critique (burn-out)*.

- Dans le cas d'une température imposée, la forte résistance thermique de la vapeur oblige l'élément chauffant à prendre cette température et suivant la valeur de celle-ci on aura ou non destruction de cet élément. C'est le "coup de feu" qui se produit par assèchement lors d'accidents dans les chaudières.

La détermination du point de "burn-out" est capitale dans l'étude de l'ébullition pour des raisons de sécurité évidentes.

Zone DE: C'est une zone instable qui ne peut se décrire qu'à température imposée en faisant varier celle-ci.

Zone au delà de E: Si l'élément chauffant est à haut point de fusion, l'évacuation de la chaleur se fait essentiellement par rayonnement. A cause de la pellicule de vapeur qui isole la paroi chauffante, cette zone est dite à "*vaporisation pelliculaire*".

Chacune de ces zones correspond à un mécanisme d'échange différent. C'est la zone BC, correspondant à l'aspect commun de l'ébullition, qui est la plus intéressante.

3.2.3- Ebullition en convection forcée dans un tube vertical

Ce phénomène est très complexe car, aux nombreuses variables régissant l'ébullition en vase, il faut ajouter tous les paramètres hydrodynamiques dépendant du débit, avec l'influence que ceux-ci peuvent avoir avec les propriétés physiques du fluide. En effet, les pertes de charge par exemple, entraînent des différences de pression qui modifient la température d'ébullition, la masse volumique de la vapeur,...etc. Il y a interaction constante entre toutes les grandeurs.

Aucune solution théorique n'étant satisfaisante, il faut établir des corrélations empiriques à partir de données expérimentales réalisées chaque fois dans des conditions bien déterminées de vitesse, de pression, de géométrie de l'écoulement, ...etc.

Examinons, à titre d'exemple, le cas le plus simple qui est celui d'un écoulement vertical ascendant dans un tube circulaire et dont la paroi est chauffée de manière uniforme (Fig.3.3).

Zone A: Il s'y produit de la convection forcée et éventuellement des bulles de dégazage.

Zone B: Ebullition locale, les bulles de vapeur se condensent au sein du liquide tant que l'ensemble de celui-ci n'a pas atteint T_{sat} .

Zone C: Le liquide étant à température T_{sat} , on a de l'ébullition nucléée, avec un coefficient d'échange meilleur que pour l'ébullition en vase à cause de l'effet d'arrachement des bulles par la vitesse.

Zone D: Les bulles, devenant très nombreuses, ont tendance à s'agglomérer (phénomène de *coalescence*) et à former des bouchons de vapeur se rassemblant au centre du tube. Cette zone est appelée "écoulement à bouchon".

Zone E: Les bouchons se rejoignent les uns les autres et forment un manchon de vapeur au centre du tube, la paroi est baignée par un mince film annulaire de liquide, d'où le nom de cette zone dite à "écoulement annulaire". La surface du film liquide en contact avec le noyau central de vapeur est extrêmement agitée, il s'y produit une évaporation intense ainsi qu'un arrachement de gouttelettes liquides.

Zone F: Le film liquide annulaire s'épuise peu à peu, laissant un contact direct entre la vapeur et la paroi chauffante. Si le flux est élevée, on a risque de *burn-out* (destruction de la paroi chauffante); s'il est modéré, la montée en température de la paroi est moins brutale, grâce en particulier aux gouttelettes liquides en suspension dans la vapeur qui viennent se déposer sur la paroi chauffante où elle s'évaporent. Le coefficient d'échange reste à une valeur acceptable et, pour différencier ce phénomène du burn-out brutal, on l'appelle "échauffement critique par assèchement" (dry-out).

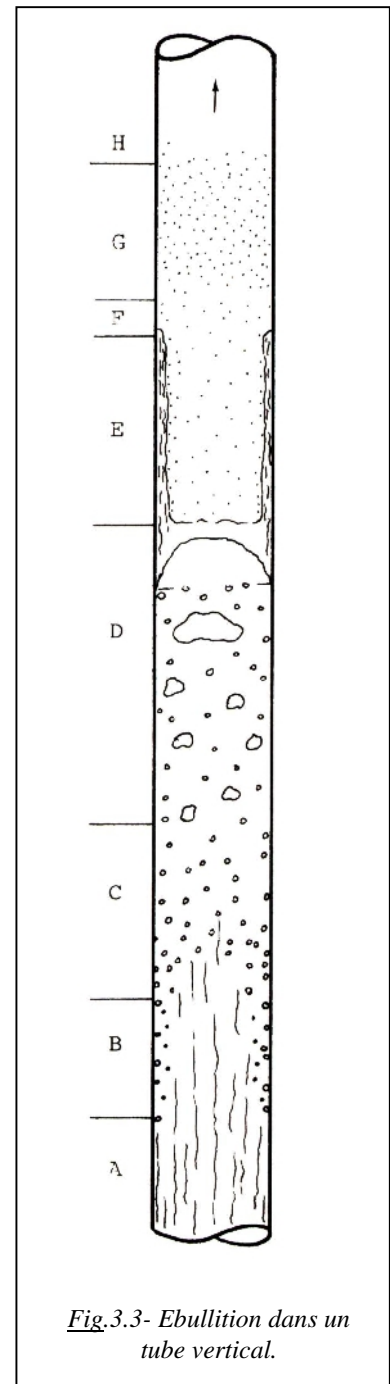


Fig.3.3- Ebullition dans un tube vertical.

Zone G: Le film liquide a complètement disparu, il ne reste plus qu'un brouillard formé de microscopiques gouttelettes en suspension dans la vapeur, d'où le nom d'*écoulement à brouillard* donné à cette zone (mist-flow).

Zone H: Il n'y a plus du tout de phase liquide, on a un écoulement simple phase de vapeur sèche où s'appliquent les lois classiques de la convection forcée.

Il est à noter qu'au long de ces zones successives, le volume de vapeur va constamment en croissant, réduisant ainsi la section de passage du liquide (à P_{atm} , 1 kg de vapeur occupe 1000 fois plus de place que 1 kg de liquide). Les conditions hydrodynamiques s'en trouvent très fortement perturbées, ce qui influe sur les conditions d'échange thermique.

Dans un tube horizontal, la description des phénomènes aurait été pratiquement la même, avec toutefois une nuance quant à l'emplacement de la vapeur, celle-ci ayant tendance à se rassembler à la génératrice supérieure du tube (effet de stratification).

3.3- Transfert de chaleur lors de la condensation

Dans de nombreux processus industriels, les échanges de chaleur en condensation jouent un grand rôle. Toute vapeur produite dans l'industrie finit par aboutir, d'une manière ou d'une autre, dans un condenseur d'un type quelconque. Il est donc important de bien connaître ces phénomènes afin d'être en mesure de définir convenablement les appareillages à mettre en oeuvre. Une vapeur pure est en équilibre avec sa phase liquide si sa pression et sa température correspondent aux conditions de saturation P_{sat} et T_{sat} . Si une vapeur à l'état (P_v, T) vient en contact avec une paroi dont la température T_p est inférieure à celle de saturation T_{sat} correspondant à P_v , une certaine masse de liquide se dépose sur la paroi froide.

Si le liquide mouille cette surface, le condensât forme un *film continu*. Ce type de condensation est le plus fréquent. Si, au contraire, le liquide ne mouille pas la surface, il se produit une *condensation en gouttes* (Fig.3.4).

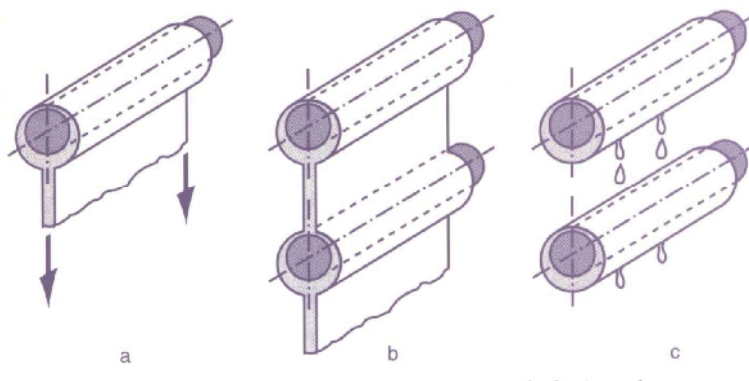


Fig.3.4- Condensation en film : a- sur tube horizontal. b- sur une rangée de tubes avec continuité du film entre nappes. c- avec écoulement en gouttes.

Le changement de phase s'accompagne de la libération d'une certaine quantité de chaleur qui transite vers la paroi froide à travers l'épaisseur du condensât déjà formé. Le coefficient d'échange à la surface de la paroi froide est donc d'autant plus élevé que cette épaisseur est plus réduite.

Deux modèles sont souvent étudiés comme modèles théoriques fondamentales: La condensation en film sur une paroi verticale et celle à l'extérieur de tubes horizontaux.

3.3.1- Condensation en film sur une paroi verticale

Dans la plupart des échangeurs industriels vapeur-liquide constitués de tubes verticaux, les tubes sont parcourus par l'eau de refroidissement et la condensation de la vapeur se produit sur leur paroi extérieure. Cette dernière peut être assimilée à une surface plane vis-à-vis du film de condensat dont l'épaisseur est très petite devant les autres dimensions.

Le calcul du coefficient d'échange se fait par application de la formule de Nusselt qui reste, malgré la restriction des hypothèses sur lesquelles elle repose, la formule fondamentale employée dans les calculs d'échangeurs verticaux. Il faut toutefois signaler que la plupart des expérimentateurs mettent en évidence des coefficients d'échange en moyenne 20% supérieurs aux valeurs indiquées par la formule de Nusselt donnant le coefficient moyen h_m .

$$h_m = 0.942 \left[\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g L' \lambda_l^3}{\mu_l H (T_{sat} - T_p)} \right]^{1/4} \quad (3.2)$$

où : ρ_v : masse volumique de la vapeur en $[\text{kg/m}^3]$,

ρ_l : masse volumique du liquide en $[\text{kg/m}^3]$,

- μ_l : viscosité dynamique du liquide [Pa.s] ,
- λ_l : conductivité thermique du liquide en [W/m°K] ,
- L' : chaleur latente en [J/kg],
- H : hauteur de la plaque [m],
- g : accélération de la pesanteur en [m/s²].

Les hypothèses sur lesquelles est basée la formule de Nusselt sont :

- Température de paroi constante et régime d'écoulement permanent.
- Le film laminaire s'écoule vers le bas sous l'action de la pesanteur est freiné par les forces de viscosité.
- Lors de la condensation, la vapeur cède sa chaleur latente à la paroi par condensation à travers le film.

3.3.2- Condensation à l'extérieur de tubes horizontaux.

Le coefficient moyen d'échange est obtenu par Nusselt par un raisonnement semblable à celui qui concerne une paroi verticale.

Dans le cas d'un tube isolé, l'épaisseur reste suffisamment faible pour que le régime d'écoulement du film soit toujours laminaire.

Condensation en gouttes:

L'intérêt majeur de la condensation en gouttes réside dans le fait qu'elle permet d'obtenir des coefficients de transfert élevés par suite de l'élimination de la résistance thermique introduite par le film, atteignant 10 à 80 fois ceux qui sont prévus par la formule de Nusselt. Elle ne se produit qu'en présence d'une surface *hydrophobe* (c-à-d qui ne se laisse pas mouiller par l'eau). En général, ce type de condensation doit être provoqué à l'aide d'un *promoteur*.

Plusieurs méthodes sont utilisées dans ce but:

- Introduction dans la phase vapeur d'un produit organique hydrophobe.
- Dépôt sur le tube de condensation d'un produit de même type sous forme liquide ou pâteuse.
- Revêtement de la surface par un matériau hydrophobe solide doué d'une bonne adhérence sur le métal support.

Les qualités d'un promoteur organique doivent être sa faible solubilité dans l'eau (pour la condensation de vapeur d'eau), sa faible toxicité, sa bonne adhérence sur le support, son fort caractère hydrophobe et son action prolongée. On emploie généralement les huiles minérales, les acides gras et leurs sels ou les cires. Comme revêtements solides, on utilise les métaux nobles (argent, palladium, platine et or) les résines polymérisées (Téflon, parylène N).

