

Echangeurs de chaleurs et récupération de la chaleur fatale

Nicolas Rimbert

Professeur, ENSEM Ecole de l'énergie, Université de Lorraine

Bureau 016 Rouge

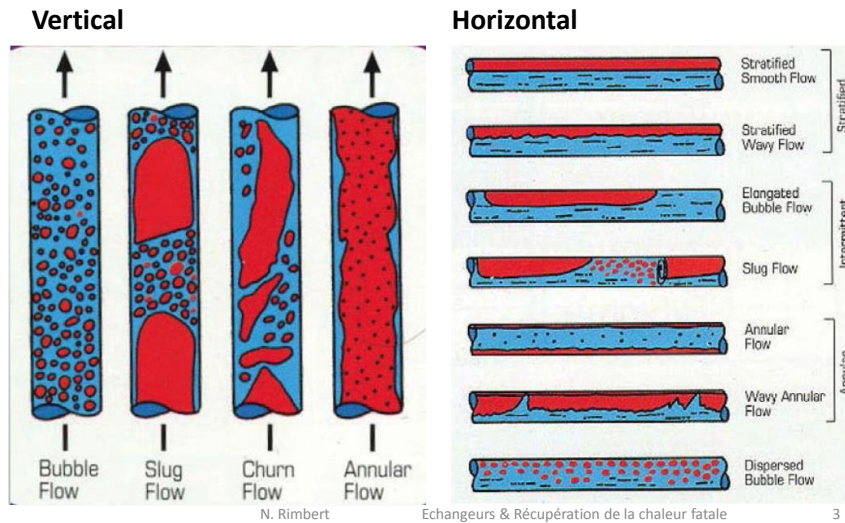
LEMTA Laboratoire des Energies et de la Mécanique Théorique
et Appliquée

Cours n° 6

Pertes de charge en multiphasique gaz-liquide

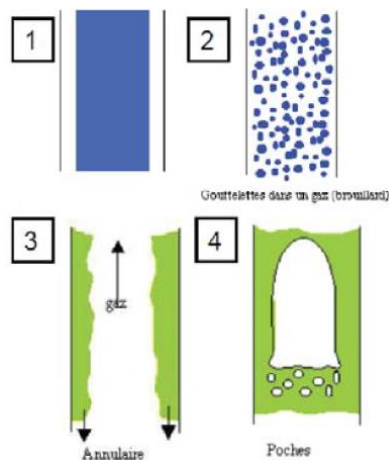
Cf. Ecoulements multiphasiques par Pr. B. Oesterlé ed. Lavoisier

Régimes d'écoulement



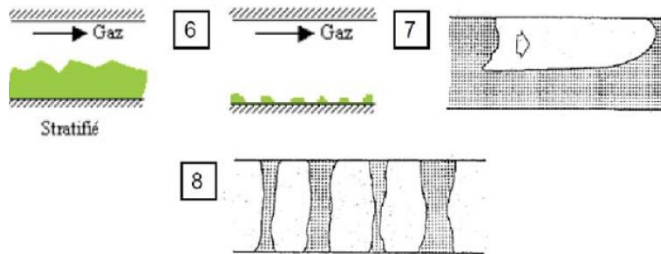
Critères de définition

- Nature de la phase pariétale
 - L, G, L+G
- Caractère d'une phase
 - Continu ou Dispersé
- Exemples
 - Pariétal Gaz continu/Liquide continu
Jet libre
 - Pariétal Gaz continu/Liquide dispersé
Brouillard
 - Pariétal Liquide continu/Gaz continu
Annulaire
 - Pariétal Liquide continu/Gaz dispersé
À poches



Quelques configurations horizontales

1. Pariétal Liquide+Gaz /Liquide et gaz continu
Stratifié
2. Pariétal Liquide+Gaz /Liquide dispersé
Gouttes
3. Pariétal Liquide+Gaz /Gaz continu
Poches et bouchons
4. Pariétal Liquide+Gaz /Liquide et Gaz dispersé
Tranches



N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

5

Définitions

• Grandeurs caractéristiques

- Titre massique

$$X = \frac{q_{mG}}{q_{mG} + q_{mL}}$$

- Titre ou qualité volumétrique

$$\beta = \frac{q_{vG}}{q_{vG} + q_{vL}}$$

- Flux massique total

$$G = \frac{q_{mG} + q_{mL}}{S}$$

- Vitesses superficielles

$$J_G = \frac{q_{mG}}{\rho_G S} \quad J_L = \frac{q_{mL}}{\rho_L S}$$

- Paramètre de Martinelli

$$X = \sqrt{\frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G}}$$

Gradient de
pression
monophasique
au même débit

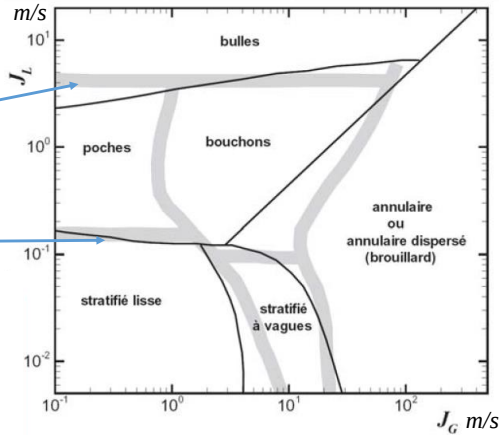
N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

6

Cartes d'écoulement (cas horizontal)

- Expériences
 - Mandhane et al. (1974)
 - Trait continu gris
- Théorie
 - Taitel & Dukler (1976)
 - Trait continu noir
- Cartes ci-contre
 - Air/eau
 - $D = 2,5 \text{ cm}$
 - Valable uniquement dans ce cas



N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

7

Transition théorique de Taitel et Dukler

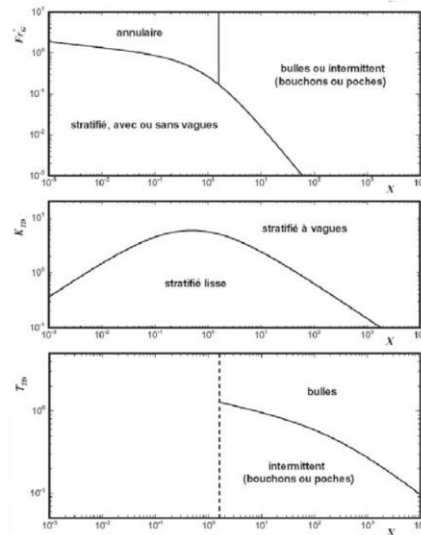
- Conduite horizontale

$$Fr_G^* = \frac{J_G}{\sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}}$$

$$K_{TD} = Fr_G^* \sqrt{Re_L} \quad Re_L = J_L D / \nu_L$$

$$T_{TD} = \sqrt{\frac{|dp/dz|_L}{g(\rho_L - \rho_G)}}$$

- X : paramètre de Martinelli



N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

8

Analyse de Taitel et Dukler

- Forme analytique
 - On teste dans l'ordre si

$$\left. \begin{array}{l} Fr_G^* > 0,704(X^{0,1} + X^{1,12})^{-1,42} \\ X < 1,6 \end{array} \right\} : \text{écoulement annulaire}$$

$$\left. \begin{array}{l} Fr_G^* > 0,704(X^{0,1} + X^{1,12})^{-1,42} \\ X > 1,6 \end{array} \right\} : \text{écoulement} \begin{cases} \text{à bulle dispersée si } T_{TD} > (0,01X + 0,52X^{0,28})^{-0,5} \\ \text{à poche ou à bouchon si } T_{TD} < (0,01X + 0,52X^{0,28})^{-0,5} \end{cases}$$

$$\text{si } Fr_G^* < 0,704(X^{0,1} + X^{1,12})^{-1,42} \text{ et } K_{TD} < (0,145X^{-0,36} + 0,24X^{0,36})^{-1,8} : \text{écoulement stratifié lisse}$$

$$\text{si } Fr_G^* < 0,704(X^{0,1} + X^{1,12})^{-1,42} \text{ et } K_{TD} > (0,145X^{-0,36} + 0,24X^{0,36})^{-1,8} : \text{écoulement stratifié à vagues}$$

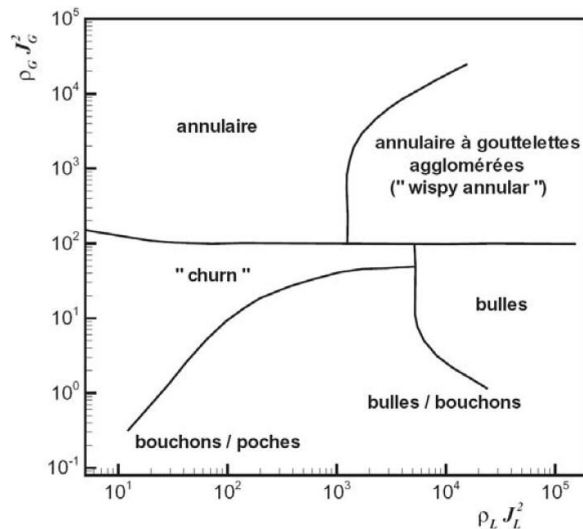
N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

9

Cartes d'écoulement (conduite verticale)

- Hewitt & Roberts
 - Écoulement ascendant
 - Coordonnées en Pa

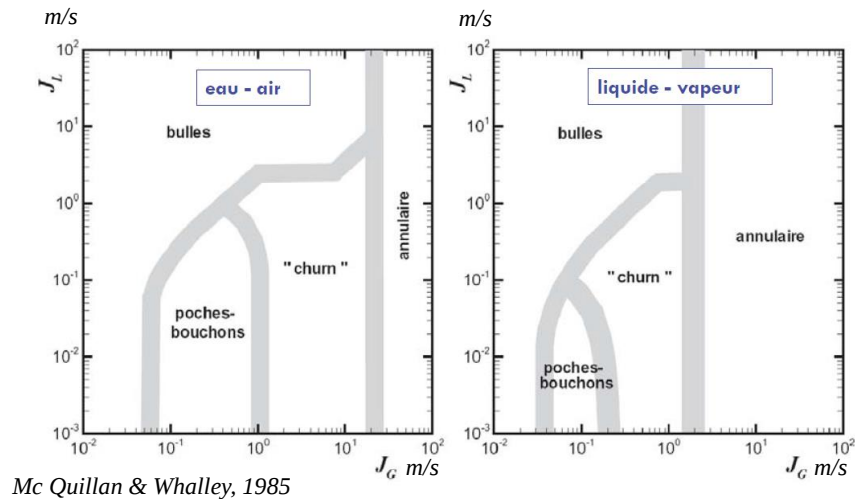


N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

10

Cartes d'écoulements (vertical ascendant)



N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

11

Pertes de charges

- Bilan de quantité de mouvement du mélange

$$S \frac{dp}{dz} = - \frac{d}{dz} \int_S (\alpha_1 \rho_1 U_{1z}^2 + \alpha_2 \rho_2 U_{2z}^2) dS - \int_S (\alpha_1 \tau_{w1} + \alpha_2 \tau_{w2}) dC + g_z \int_S \rho dS$$

- p : pression moyenne sur la section

- Densité moyenne

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2$$

- Principe des modèles globaux

- Hypothèses (simplificatrices)
 - Gradient de pression moyen
 - Configuration d'écoulement

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

12

Calcul pratique des frottements

- Gradient de pression du au frottements

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G+L} = \Phi_G^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_G = \Phi_L^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_L$$

- « multiplicateurs diphasiques » $\Phi_G = X \Phi_L$
- Modèle homogène (fluide unique équivalent)
 - Écoulement dispersé (très petites bulles, faible taux de vide)

$$\Phi_L^2 \approx \frac{1}{(1-\alpha_G)^2} \approx \frac{1}{(1-\beta_G)^2}$$

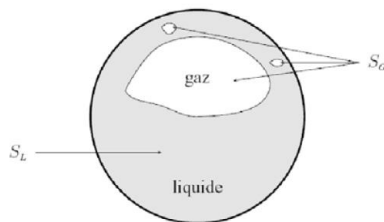
- Modèle homogène corrigé de Storek-Brauer
- Modèle à phases séparées de Lockhart-Martinelli

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

13

Modèle de Lockhart-Martinelli



$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G+L} = \frac{1}{2} \rho_G V_G^2 \frac{\lambda_G}{D_G} = \frac{1}{2} \rho_L V_L^2 \frac{\lambda_L}{D_L}$$

Diamètre équivalents des sections de passage S_G et S_L

$$V_G = J_G \frac{S}{S_G}$$

$$V_L = J_L \frac{S}{S_L}$$

- Hypothèses fondamentales

- Φ_G , Φ_L et α_G fonctions uniquement de X
- pas de changement de phase (x constant)
- écoulement diphasique équivalent à 2 écoulements monophasiques en « parallèle »

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

14

Corrélations de Chisholm

- On utilise

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2$$

$$\alpha_G = 1 - \frac{X}{\sqrt{1 + 20X + X^2}}$$

$$= 1 - \frac{1}{\Phi_{Lt}}$$
- bon
 - stratifié, vague, bouchon
- moyen
 - dispersé à bulle, annulaire

$Re_G = \frac{q_{mG} D}{\mu_G S}$ $Re_L = \frac{q_{mL} D}{\mu_L S}$	<2000	>2000
<2000	Laminaire Laminaire $C = 5 (ll)$	G turbulent L Laminaire $C = 12 (lt)$
>2000	G Laminaire L turbulent $C = 10 (tl)$	G turbulent L turbulent $C = 20 (tt)$

N. Rimbart

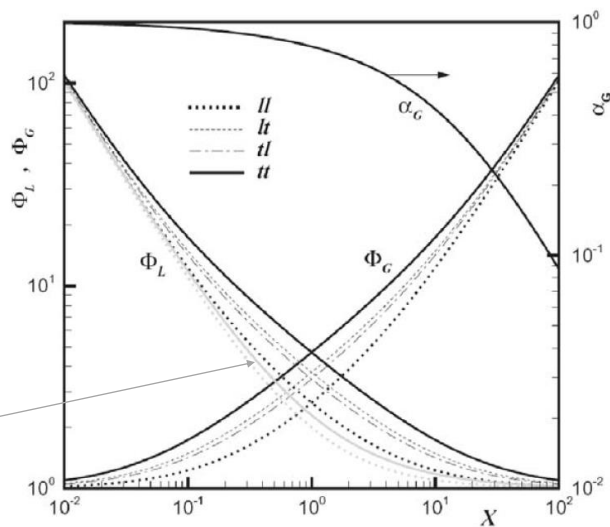
Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

15

Abaque de Lockart-Martinelli

Obtenue à partir
des corrélations de
Chisholm

Analyse théorique



N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

16

Modèle de Storek et Brauer (1)

- Coefficient de perte de charge homogène équivalent

$$\lambda_H = \sqrt{\left(\frac{64}{\text{Re}_H}\right)^2 + \left(\frac{0.3164}{\text{Re}_H^{0.25}}\right)^2 + \left(\frac{0.036}{\text{Re}_H^{0.1}}\right)^2}$$

- Définition de l'écoulement homogène équivalent

$$\text{Re}_H = \frac{\rho_H J_H D}{\mu_H} = \frac{GD}{\mu_H}$$

$$\rho_H = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1} \quad \mu_H = \left(\frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L}\right)^{-1} \quad J_H = \frac{G}{\rho_H} = J_G + J_L$$

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

17

Modèle de Storek et Brauer (2)

- Gradient de pression du aux frottements

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G+L} = \frac{1}{2} \psi_c \rho_H J_H^2 \frac{\lambda_H}{D} = \psi_c \lambda_H \frac{G^2}{2D\rho_H}$$

- coefficient correcteur

$$\bullet \varepsilon: \text{rugosité} \quad y = (1-x) / x = q_{mL} / q_{mG}$$

$$\psi_c = \frac{\sqrt{1 + 51 \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.8}}}{\left((1 + C_1 y^{0.4})^{-1} + (C_2 y^{-0.8} + C_3 y)^{-2} + (1 + 16 y^{-0.4})^{-1}\right)^{0.25}}$$

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

18

Modèle de Storek et Brauer (3)

Calcul des coefficients C_1 , C_2 , C_3

Horizontal

$$C_1 = 0.6 Fr_H^{1.6} \frac{\mu_L}{\mu_G}$$

$$C_2 = 1.6 Fr_H^{0.8} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.6} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0.3}$$

$$C_3 = 0.02 Fr_H^{0.4} We_H^{0.17} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.47}$$

$$Fr_H = \frac{J_H}{\sqrt{gD}} = \frac{G}{\rho_H \sqrt{gD}}$$

Vertical

$$C_1 = 0.6 Fr_H^{-0.74} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.2} \frac{\mu_L}{\mu_G}$$

$$C_2 = 4.1 \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.55} \frac{\mu_L}{\mu_G}$$

$$C_3 = 0.01 Fr_H^{0.4} We_H^{0.05}$$

$$We_H = \frac{\rho_H J_H^2 D}{\gamma} = \frac{G^2 D}{\rho_H \gamma}$$

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

19

Modèle de Garcia et al.

• Conduite horizontale

- Comparaison avec 2000 résultats expérimentaux

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{G+L} = \frac{1}{2} \rho^* J_H^2 \frac{\lambda^*}{D} \quad \lambda^* = a_2 Re^{b_2} + \frac{a_1 Re^{b_1} - a_2 Re^{b_2}}{(1 + a_3 Re^{b_3})^c}$$

$$\rho^* = (1-x) \rho_L + x \rho_G \quad Re = J_H D / \nu_L$$

$a_1 = 55.92$	$b_1 = -0.9501$	
$a_2 = 0.37$	$b_2 = -0.2534$	
$a_3 = 1.10^{-12}$	$b_3 = 4.864$	$c = 0.1972$

• Bien adapté

- Écoulements à bulles, à poches ou stratifiés

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

20

Ecoulement liquide-vapeur (1)

- Titre x variable le long de la conduite, entre $x(0)$ et $x(l)$
 - On définit

$$\Phi_{L0}(x) = \sqrt{\frac{(dp/dz)_{L+G}}{(dp/dz)_{L0}}} \quad \leftarrow \text{Perte de charge d'un écoulement monophasique liquide de débit égal au débit massique total}$$

- Corrélations disponibles

- Wallis $\Phi_{L0}^2 = \left(1 + x \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}\right) \left(1 + x \frac{\mu_L - \mu_G}{\mu_G}\right)^{-1/4}$
- Chisholm-Baroczy
- Friedel (basée sur plus de 25000 points expérimentaux)

$$\Phi_{L0}^2 = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L \lambda_{G0}}{\rho_G \lambda_{L0}} + 3.24 x^{0.78} (1-x)^{0.24} HFr^{-0.09} We^{-0.035}$$

Ecoulement liquide-vapeur (2)

- Avec $H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.7}$

$$Fr = \frac{G}{\rho_H \sqrt{gD}} \quad We = \frac{G^2 D}{\rho_H \gamma}$$

- Si x varie linéairement suivant z , on a
 - Perte de pression due au frottement

$$\Delta p_f = - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{L0} \frac{L}{x(L) - x(0)} \int_{x(0)}^{x(L)} \Phi_{L0}^2(x) dx$$