UNE INTRODUCTION AUX ECOULEMENTS DIPHASIQUES

Le taux de présence : techniques expérimentales et modèles

HERVE LEMONNIER

DTN/SE2T, CEA/Grenoble, 38054 Grenoble Cedex 9
Tél. 04 38 78 45 40, *herve.lemonnier@cea.fr*

INSTN, décembre 2009

FONCTION INDICATRICE DE PHASE

- Définition de la fonction indicatrice de phase :

$$X_k(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } M(r) \in \text{ phase } k, \\ 0 & \text{si } M(r) \notin \text{ phase } k. \end{cases}$$

- Moyennes spatiales :

$$\text{phasique : } < f >_n \triangleq \frac{1}{D_{kn}} \int_{D_{kn}} f_k \mathrm{d}V,$$

$$\text{globale : } \nprec f \nsucc_n \triangleq \frac{1}{D_n} \int_{D_n} f \mathrm{d}V.$$

OPÉRATEURS DE MOYENNE (SUITE)

- Moyennes temporelles :

$$\text{phasique} : \overline{f}_k^X(t) \triangleq \frac{1}{T_k} \int_{[T_k]} f(\tau) \mathrm{d}\tau,$$

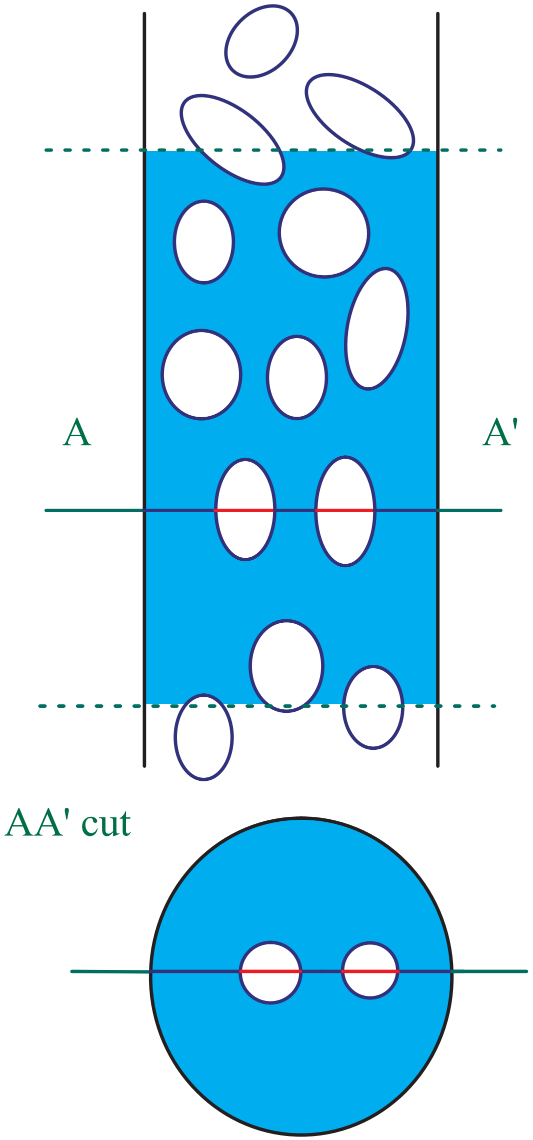
$$\text{globale} : \overline{f}(t) \triangleq \frac{1}{T} \int_{[T]} f(\tau) \mathrm{d}\tau.$$

- Propriétés de commutativité :

$$\overline{R_{kn} < f_k >_n} = \nleq \alpha_k \overline{f}_k^X \ngeq_n.$$

- Taux de présence de phase : moyennes de la fonction indicatrice de phase
- Taux de présence du gaz : taux de vide (*void fraction*, *gas hold-up*).

TAUX DE VIDE (α)



- Taux de présence local (gaz, taux de vide) :

$$\alpha_G(\mathbf{r}, t) \triangleq \overline{X_G} = \frac{T_G}{T}.$$

- Fraction spatiale instantanée.
  - Taux de présence linéique :

$$R_{G1}(t) \triangleq \langle X_G \rangle_1 = \frac{L_G}{L_G + L_L} = \frac{L_G}{L}$$

  - Taux de présence surfacique :

$$R_{G2}(t) \triangleq \langle X_G \rangle_2 = \frac{A_G}{A_G + A_L} = \frac{A_G}{A}$$

  - Taux de présence volumique :

$$R_{G3}(t) \triangleq \langle X_G \rangle_3 = \frac{V_G}{V_G + V_L} = \frac{V_G}{V}$$

PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES

- Commutativité ($f = 1$) : $\overline{R_{kn}} = \lessdot\, \alpha_k \gtrdot_n \quad = \overline{\lessdot\, X_k \gtrdot_n}$.
- Taux de présence moyen.
  - sur une ligne,

$$\overline{R_{G1}} = \frac{1}{T}\int_{[T]} R_{G1}(\tau)\,\mathrm{d}\tau = \frac{1}{L}\int_L \alpha_G \mathrm{d}L$$

  - sur une section,

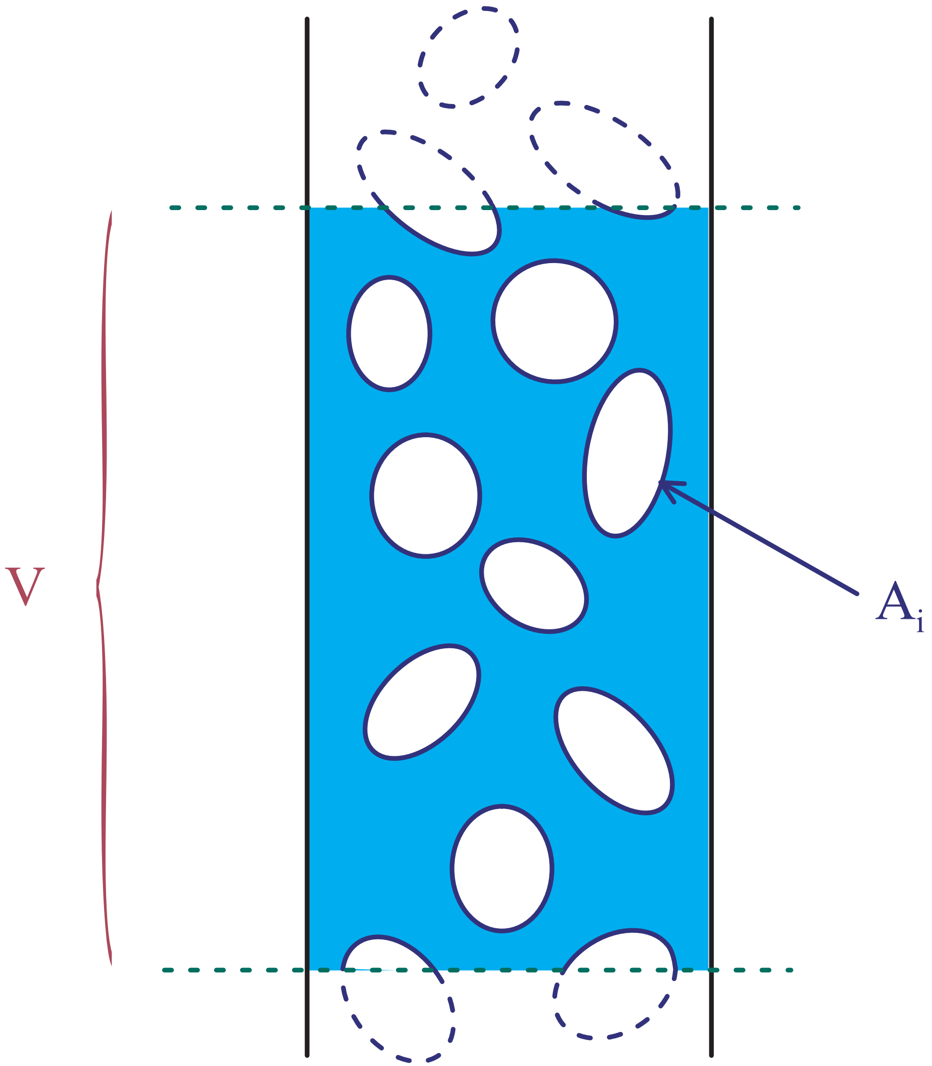
$$\overline{R_{G2}} = \frac{1}{T}\int_{[T]} R_{G2}(\tau)\,\mathrm{d}\tau = \frac{1}{A}\int_A \alpha_G \mathrm{d}A$$

  - dans un volume,

$$\overline{R_{G3}} = \frac{1}{T}\int_{[T]} R_{G3}(\tau)\,\mathrm{d}\tau = \frac{1}{V}\int_V \alpha_G \mathrm{d}V$$

- Les différentes définitions du taux de présence sont précises. Ce sont toujours des moyennes de la FIP.

AUTRES DÉFINITIONS



- Aire interfaciale volumique (instantanée) :

$$\Gamma_3(t) \triangleq \frac{A_i(t)}{V}$$

- Aire interfaciale locale :

$$\gamma = \sum_{\text{disc.} \in [T]} \frac{1}{|\mathbf{v}_i . \mathbf{n}_k|}$$

- Identité (commutativité des termes d'interaction), aire interfaciale moyenne :

$$\overline{\Gamma_3} \equiv \langle\!\langle \gamma \rangle\!\rangle_3$$

- Quantité mesurable.

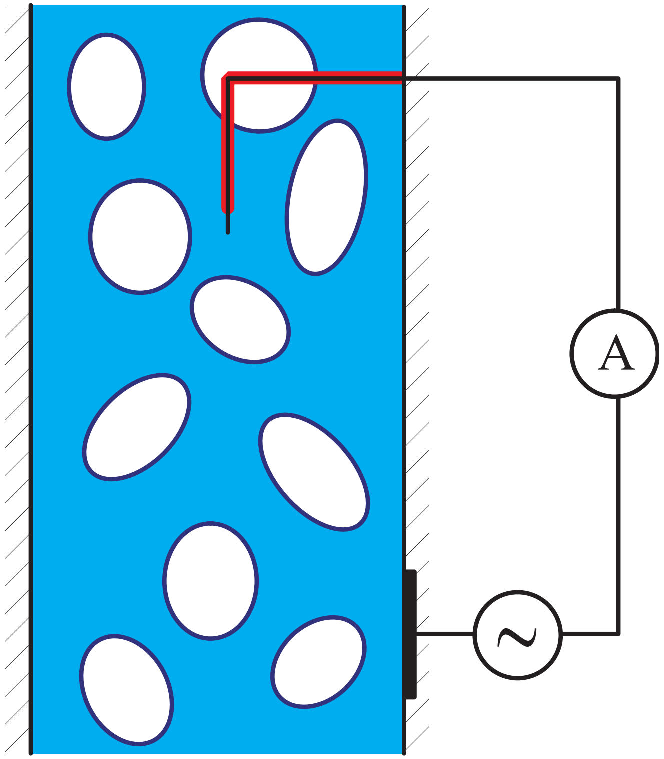
TAUX DE VIDE : TECHNIQUES DE MESURE

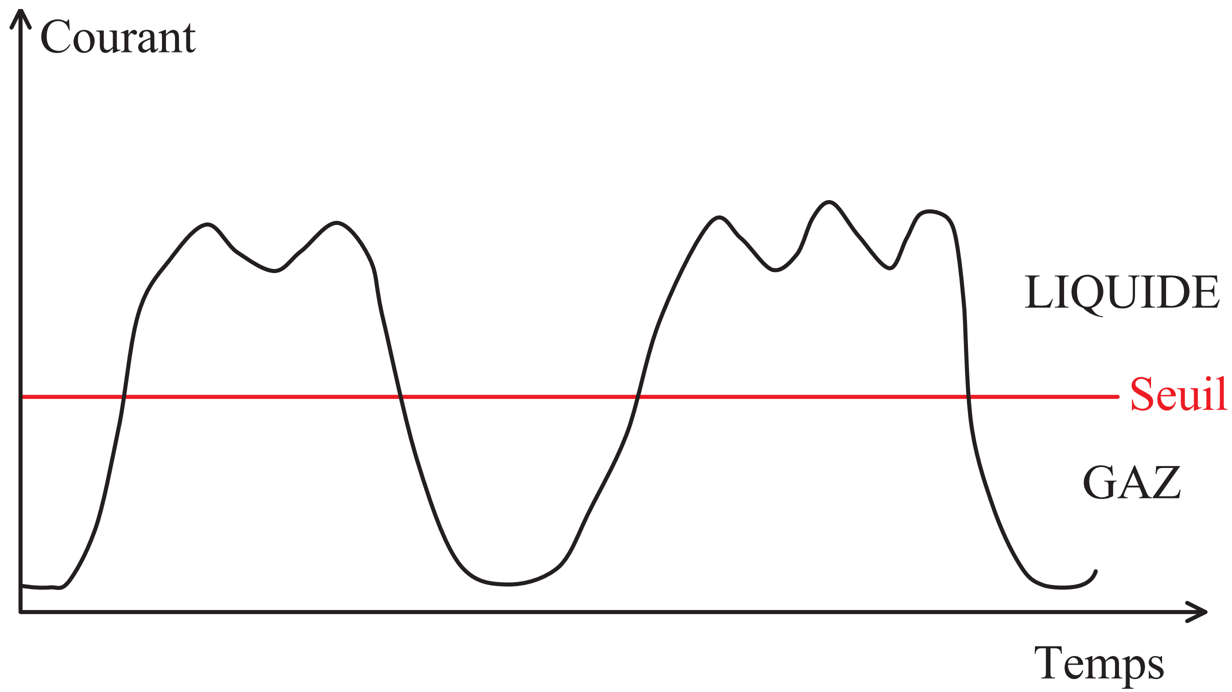
- Taux de vide local,
  - Sondes électriques
  - Sondes optiques
- Taux de présence sur une ligne,
  - Atténuation photonique (X ou γ)
- Taux de présence sur la section,
  - Rayons X ou γ (*one-shot*)
  - Densitométrie multi-faisceaux
  - Diffusion de neutrons (acier, eau-vapeur HP-HT)
  - Densitométrie à impédance
- Taux de vide moyen (volumique),
  - Vannes à fermeture rapide
  - Variation de pression hydrostatique
  - Méthodes ultrasonores (Bensler, 1990).
- Imagerie médicale, CT et MRI

TAUX DE VIDE LOCAL

Sondes électriques (résistivité) :
Mesure de la fonction indicatrice de phase, $X_L(\mathbf{r}, t)$ (FIP).

- Milieu continu conducteur
- Milieu dispersé isolant
- Seuillage $\rightarrow X_L \rightarrow \alpha_L$

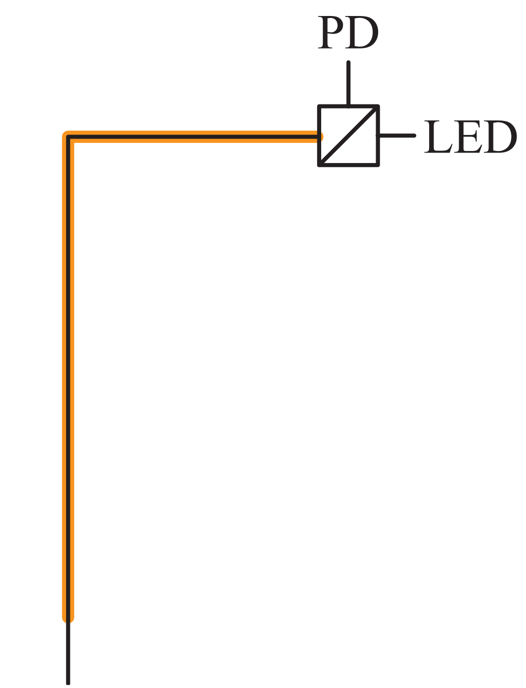




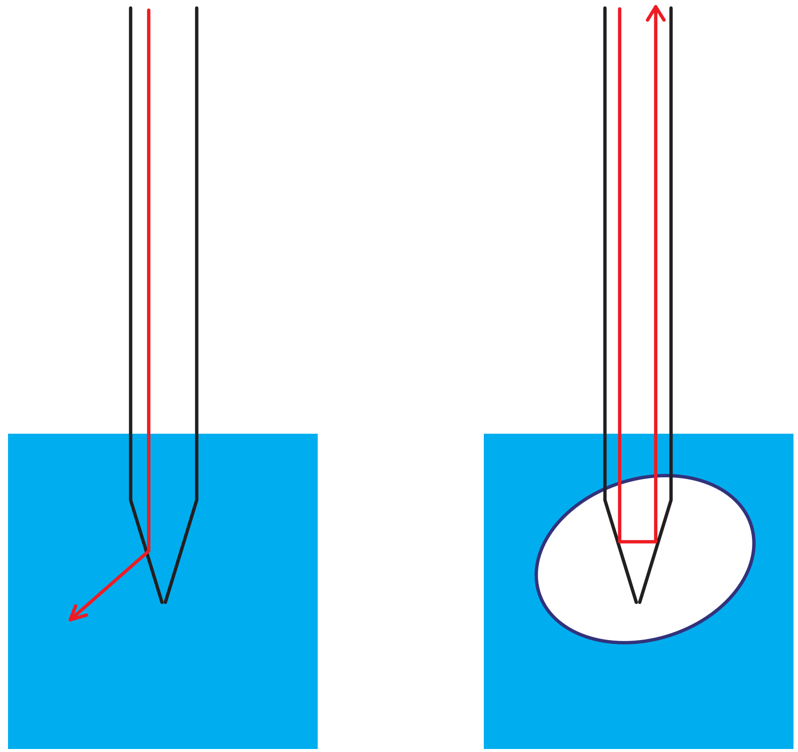
TAUX DE VIDE LOCAL

Sondes optiques (indice optique) :

Mesure de la fonction indicatrice de phase, $X_G(\mathbf{r}, t)$ (FIP).



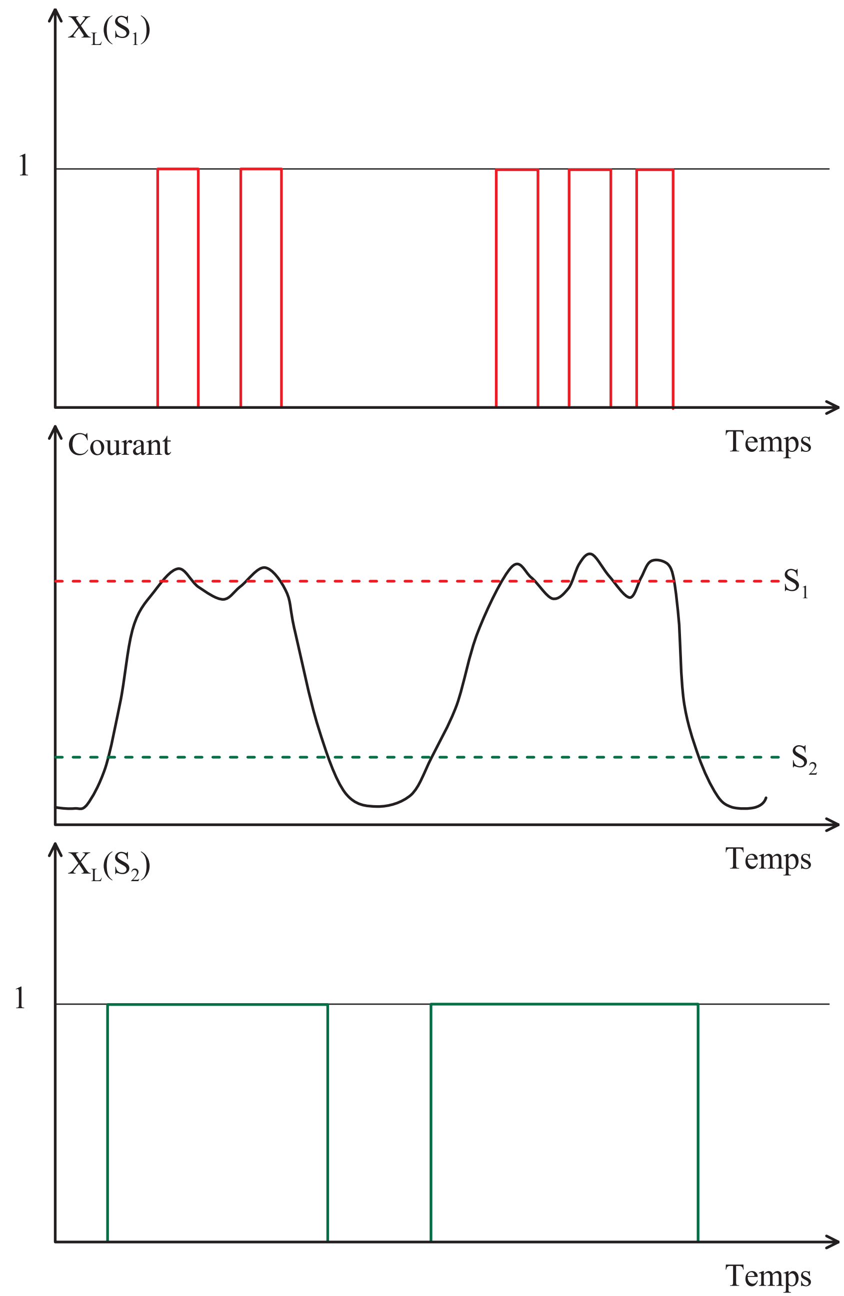
Eau, fréons, $T < 110°\mathrm{C}$



Eau :
Réfraction

Air :
Réflexion

DÉTERMINATION DES SEUILS



- $\alpha = \overline{X_L}$, dépend du seuil :

$$S_1 > S_2 \Rightarrow \alpha_{L1} < \alpha_{L2}.$$

- Méthode de référence :

$$\Delta p \rightarrow \overline{R_{G2}}$$

- Rappel :

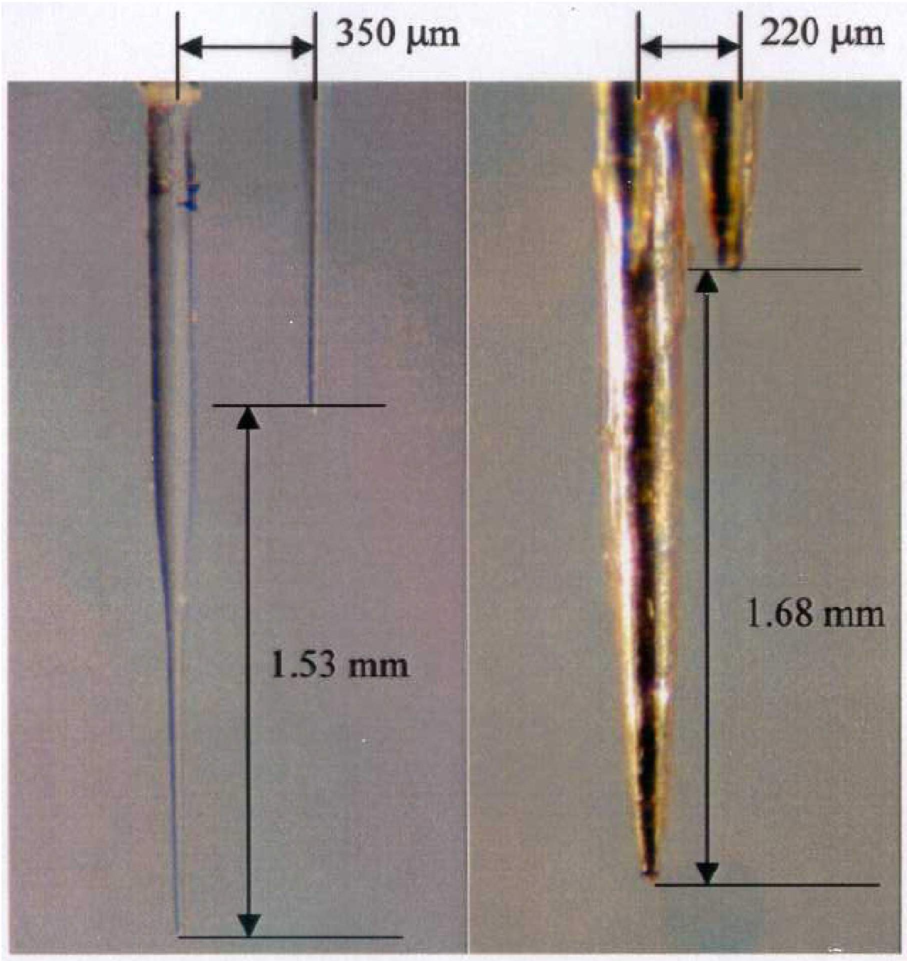
$$\langle\!\langle \alpha_G \rangle\!\rangle_2 = \overline{R_{G2}}$$

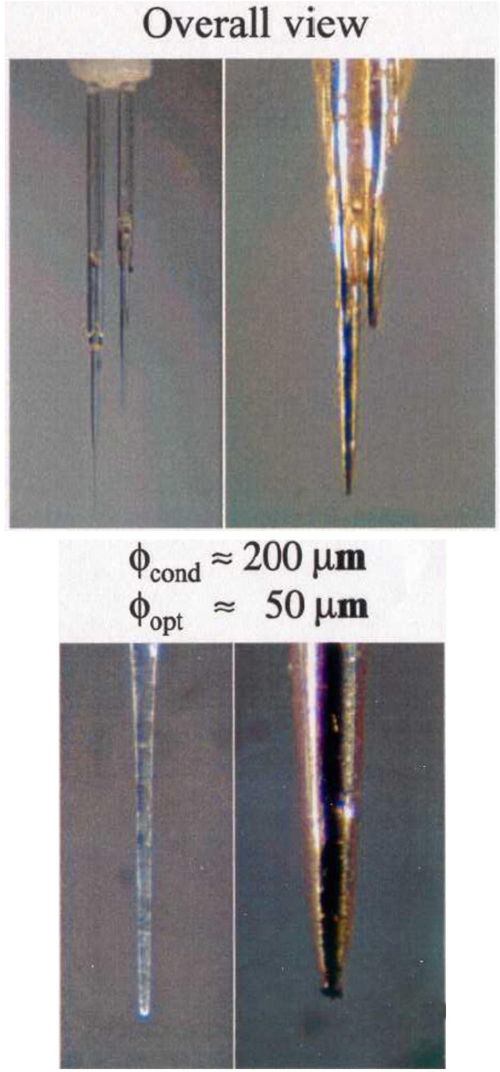
- On détermine sur A, $\alpha_G(S)$.
  On ajuste S :

$$\langle\!\langle \alpha_G(S) \rangle\!\rangle_2 = \overline{R_{G2}}$$

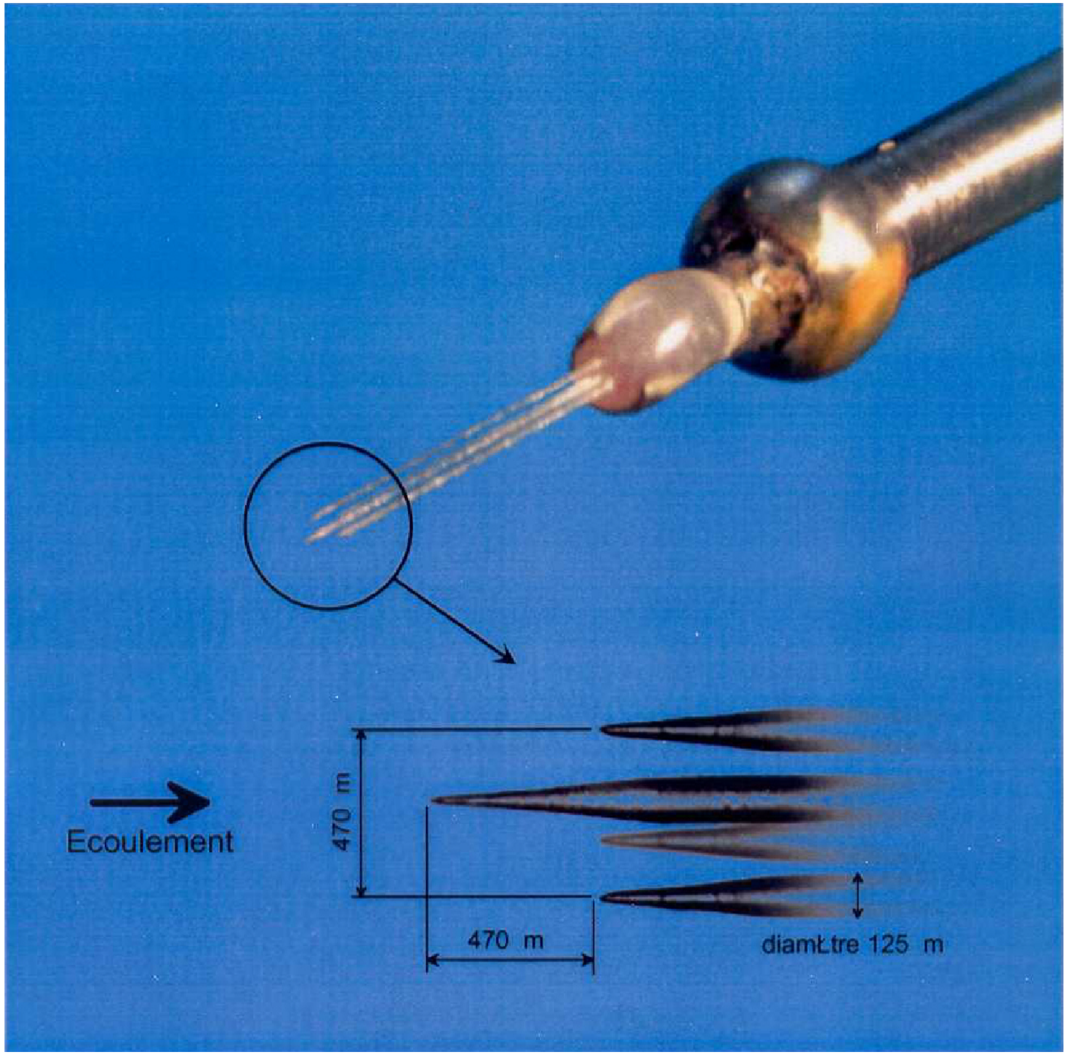
- Contrôle de cohérence.

SONDES OPTIQUES ET ÉLECTRIQUES





SONDES À POINTES MULTIPLES



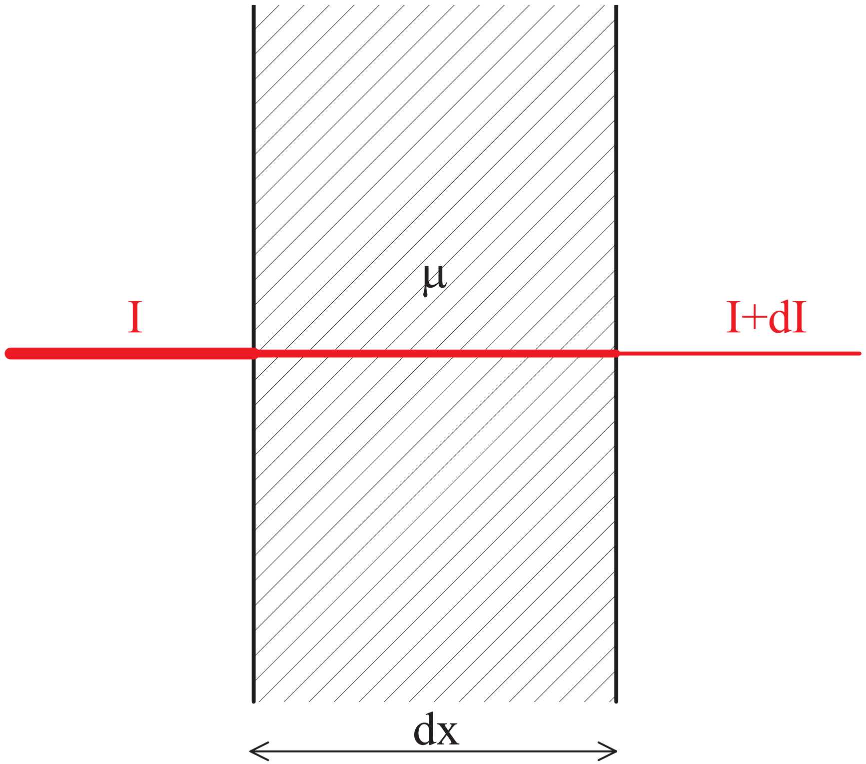
- 2 pointes : hypothèses statistiques et bulles sphériques, histogramme des cordes→diamètre moyen, vitesse moyenne des bulles.
- 4 pointes, négliger la courbure, orientation ($\mathbf{n}_k$), vitesse de déplacement de l'interface, $\mathbf{v}_i \,.\, \mathbf{n}$
- Aire interfaciale locale,

$$\gamma = \sum_{\text{disc.} \in [\mathrm{T}]} \frac{1}{|\mathbf{v}_i . \mathbf{n}_k|}$$

- Diamètre de Sauter moyen (D_{32}), identité (bulles)

$$\gamma = \frac{6\alpha}{D_{SM}}$$

ATTÉNUATION PHOTONIQUE

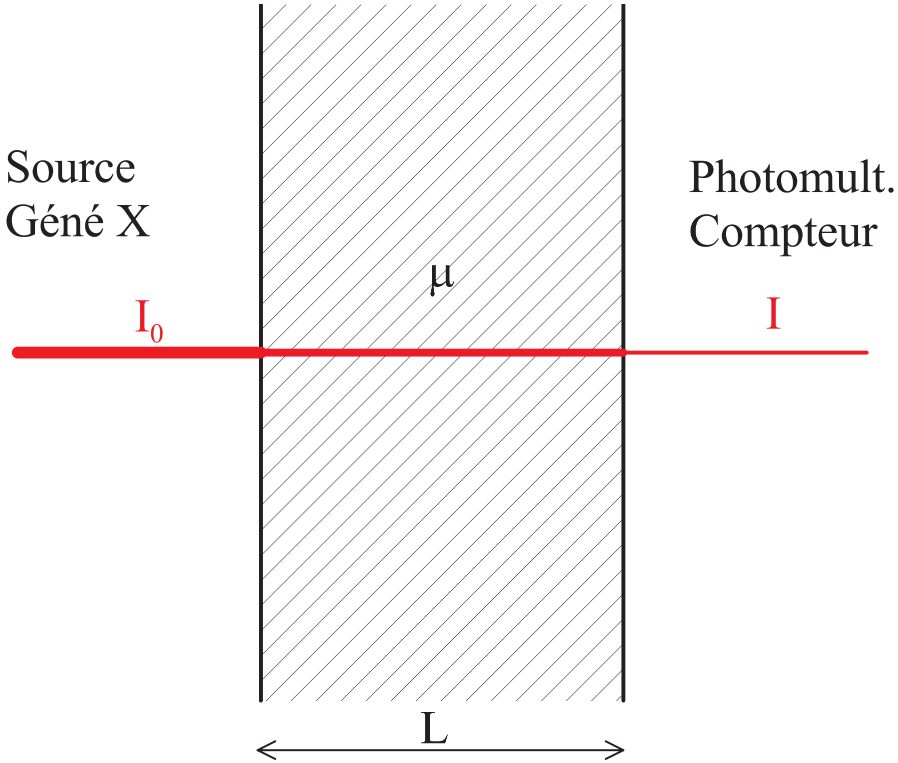


- X ou γ.
- Faisceau collimaté, mono-énergie (raie)
- Loi de Beer-Lambert :

$$\mathrm{d}I = -\mu I \mathrm{d}x, \quad [\mu] = \mathrm{L}^{-1}$$

- Absorption linéaire, μ coefficient d'absorption linéique.
- $\dfrac{\mu}{\rho}$: absorption spécifique, dépend de f.

MISE EN OEUVRE

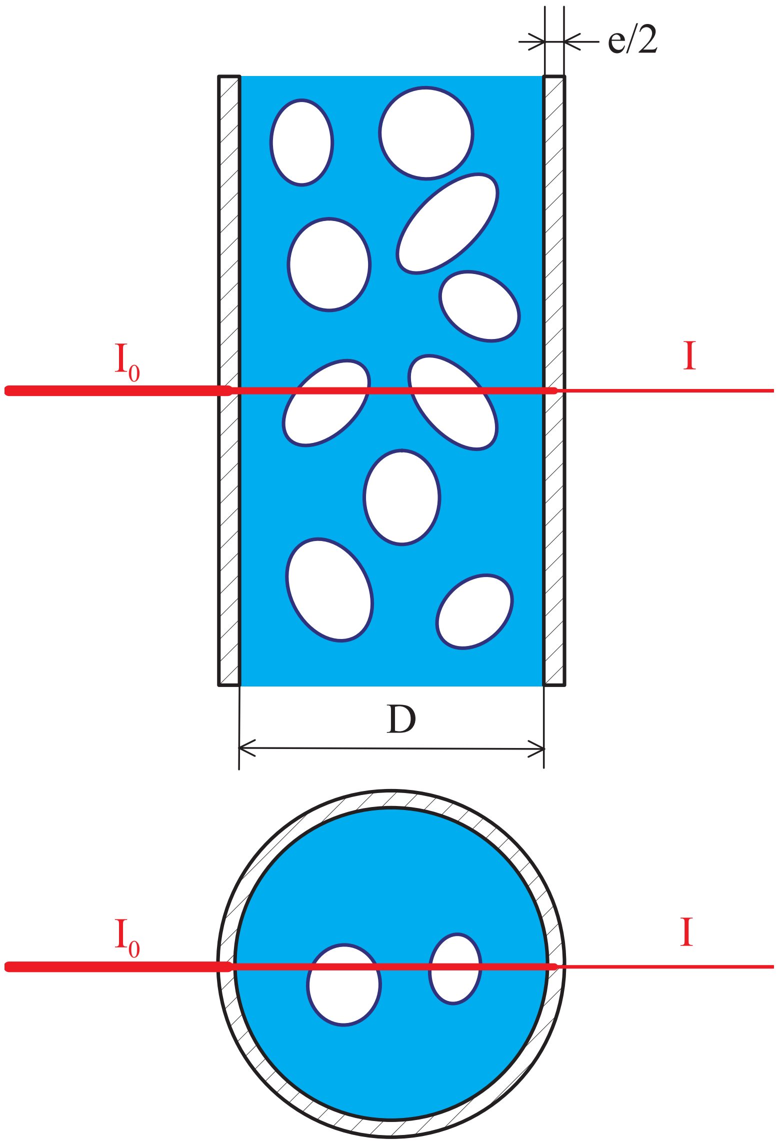


- Générateur X, ou source γ
- Réception : photo-multiplicateur (NaI, semi-conducteurs), compteur
- Collimation : bloc percé, 0,5 mm
- Faisceau collimaté, mono-énergie (raie)
- Intégration sur épaisseur finie

$$I = I_0 \exp(-\mu L) = I_0 \exp\left(-\frac{\mu}{\rho}\rho L\right)$$

- A basse pression insensible au gaz.

TAUX DE PRÉSENCE SUR UNE LIGNE



Ecoulement eau-air, liquide vapeur.

- Diamètre D, épaisseur des parois $e/2$.
- Loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 \exp(-\mu_p e) \exp\left(-\mu_L (1 - R_{G1}) D\right) \exp(-\mu_G R_{G1} D)$$

- Taux de présence linéique :

$$R_{G1}(z,t) \triangleq \frac{L_G}{L_G + L_L} = \frac{L_G}{D}$$

- Approximation basse pression :

$$I_G = I_0 \exp(-\mu_p e)$$

$$I_L = I_0 \exp(-\mu_p e) \exp\left(-\mu_L D\right)$$

$$I = I_0 \exp(-\mu_p e) \exp\left(-\mu_L (1 - R_{G1}) D\right)$$

$$\boxed{R_{G1} = \frac{\ln I/I_L}{\ln I_G/I_L}}$$

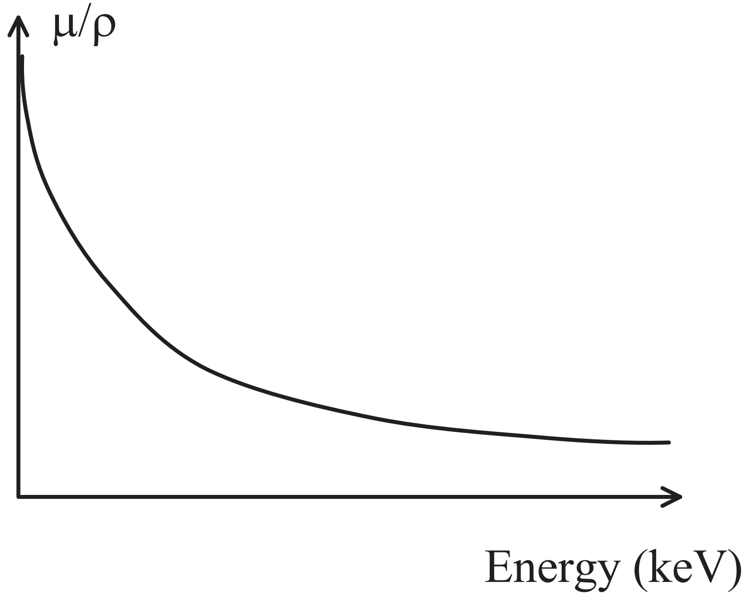
SOURCES D'ERREURS

- Contraste $\rightarrow$ basse énergie

$$\frac{I_G}{I_L} = \exp\left(\frac{\mu_L}{\rho_L}\rho_L D\right)$$

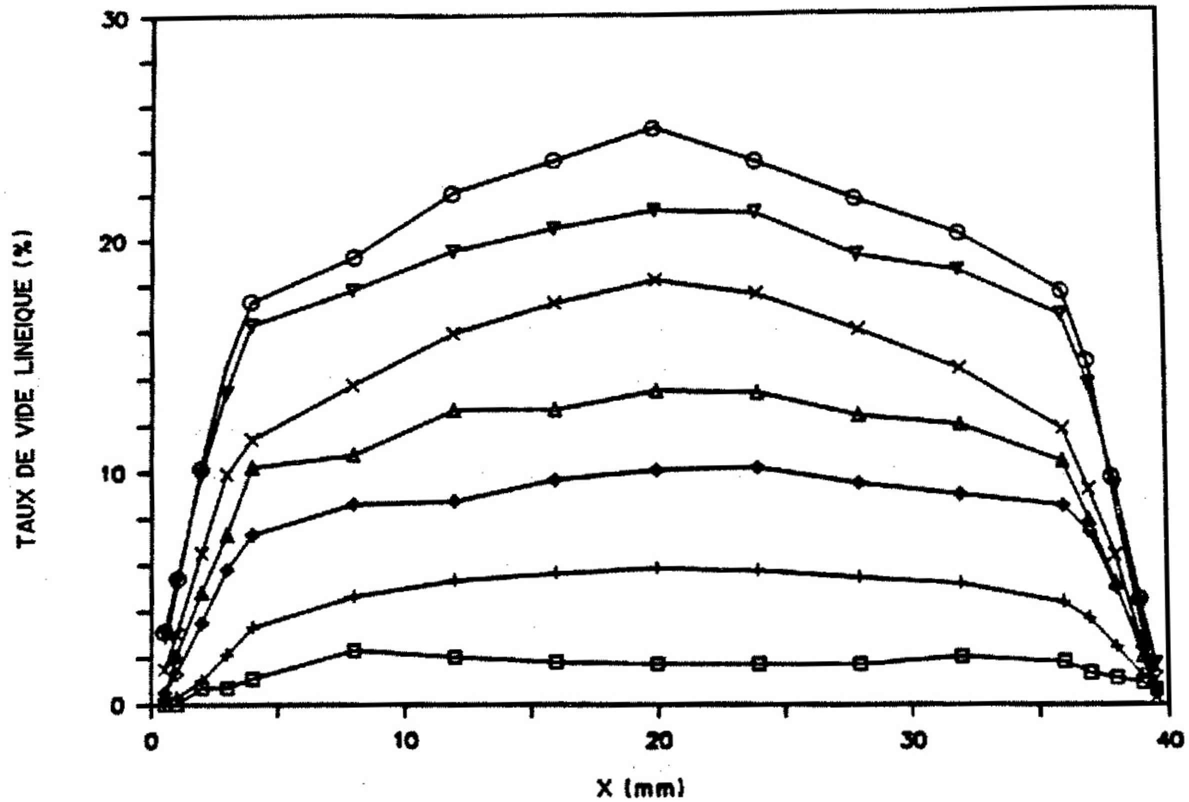
- Erreurs statistique, bruit $\rightarrow$ haute énergie

$$I \propto N, \quad \frac{\Delta N}{N} \propto \sqrt{\frac{1}{N}}$$



- Fluctuations de taux de vide : $\overline{\exp I} \neq \exp \overline{I}$, $\Delta R_G \approx 0,20$ (slug), $\Delta R_G \approx 0,05$ (churn).
- Stabilité de la source : faisceau de référence, $I \rightarrow \frac{I}{I_0'}$
- Durcissement de spectre, étalonnage direct, $I(R_L)$. Filtres.

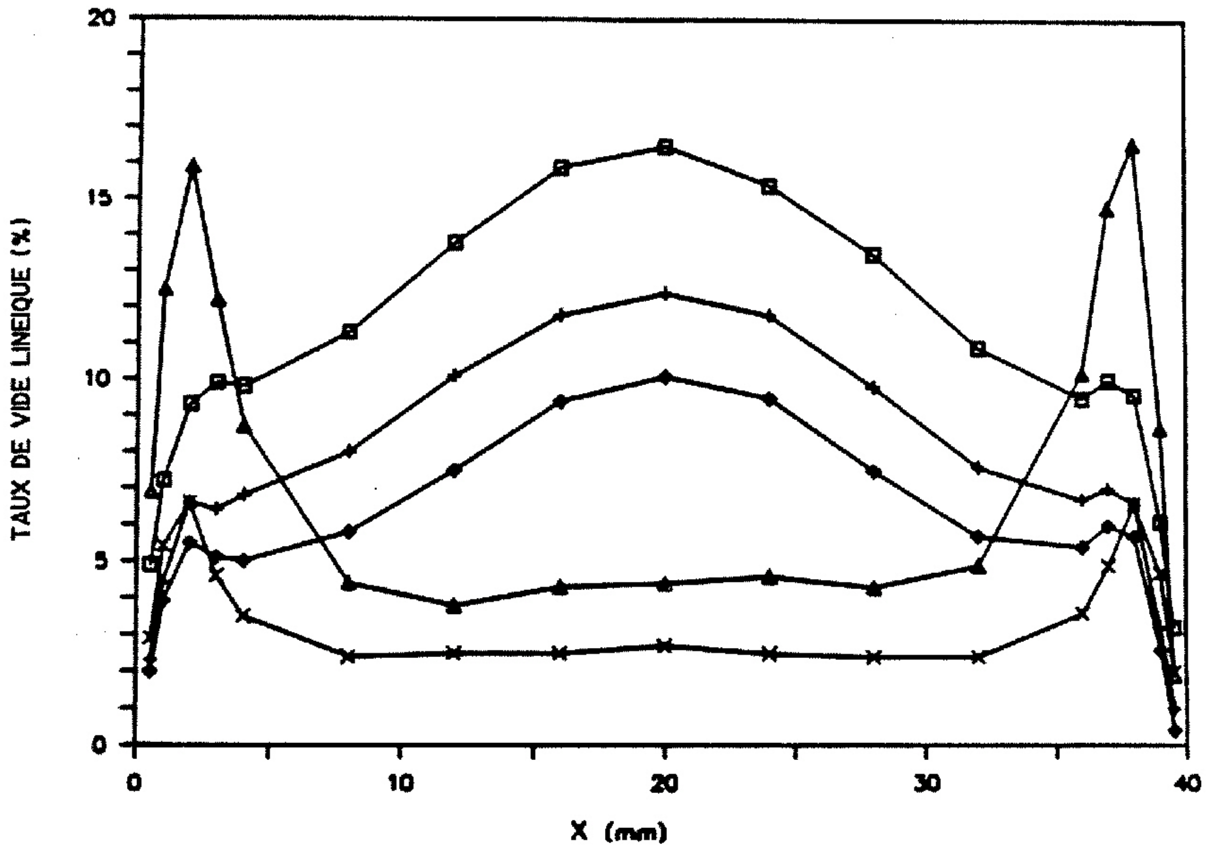
TAUX DE PRÉSENCE LINÉIQUE



D'après Bensler (1990, p. 60)

- Eau stagnante : $\overline{R_{G2}} = 0{,}01,\ 0{,}04,\ 0{,}07,\ 0{,}10,\ 0{,}13,\ 0{,}16,\ 0{,}19.$

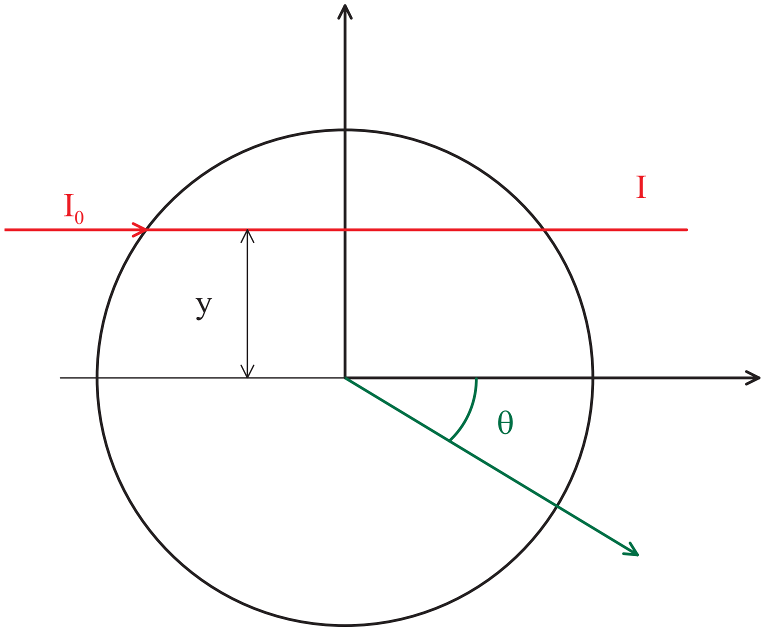
TAUX DE PRÉSENCE LINÉIQUE



D'après Bensler (1990, p. 61)

- Ecoulement diphasique, $J_L = 2$ m/s : $\overline{R_{G2}} = 0{,}03,\ 0{,}061,\ 0{,}069,\ 0{,}089,\ 0{,}123.$
- Pic de taux de vide en paroi, *wall peaking*, toujours un défi pour la modélisation...
- Transition, plat-concave, amas de bulles.

TAUX DE PRÉSENCE SURFACIQUE



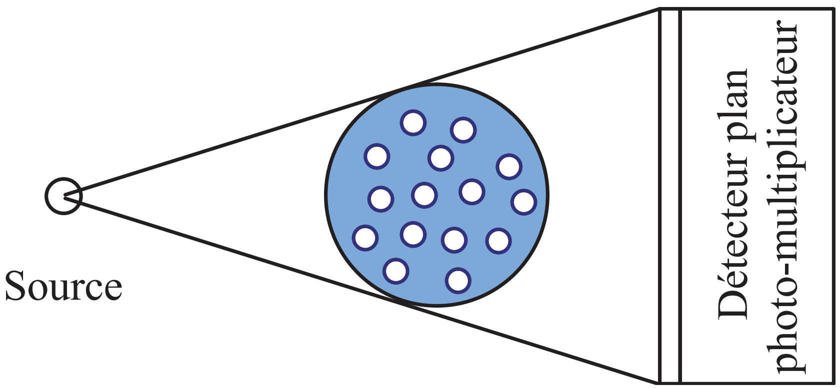
- Moyenne spatiale $\overline{R_{G2}}$,

$$\overline{R_{G2}} = \frac{1}{\pi R^2} \int_{-R}^{R} \overline{R_{G1}}(y) \sqrt{R^2 - y^2} \mathrm{d}y$$

- Inversion tomographique, axisymétrie

$$\overline{R_{G1}}(y) \Leftrightarrow \alpha_G(r)$$

$$\overline{R_{G1}}(y, \theta) \Leftrightarrow \alpha_G(X, Y)$$

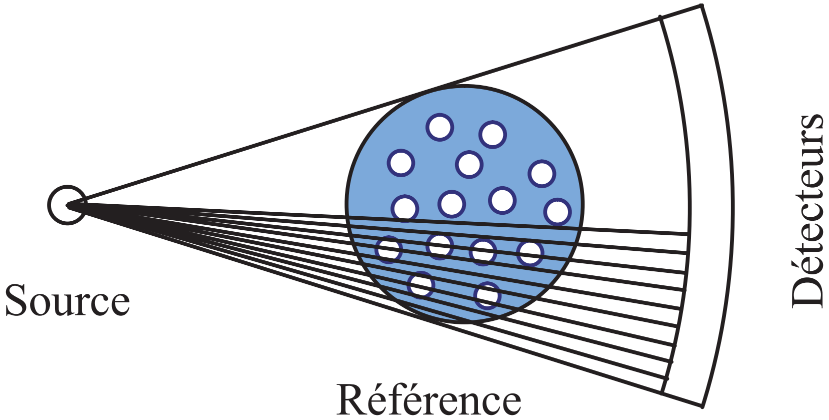


- Valeur instantanée, $R_{G2}(t)$
- Limitations connues, Compton, diffusion

$$\Delta R_{G2} \leqslant 0,05$$

$$0 < R_{G2} < 0,8$$

TAUX DE PRÉSENCE SURFACIQUE



- Densitomètre multi-faisceaux,

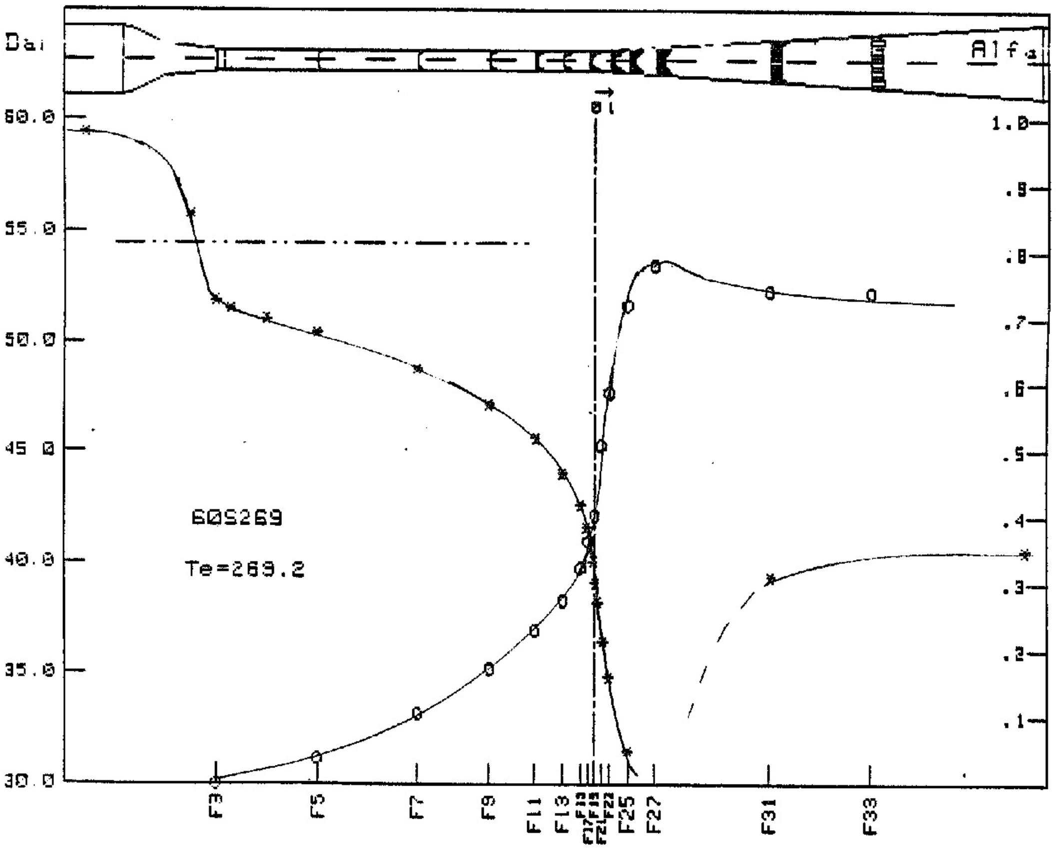
$$\overline{R_{G1}}(\theta) \Leftrightarrow \alpha_G(r)$$

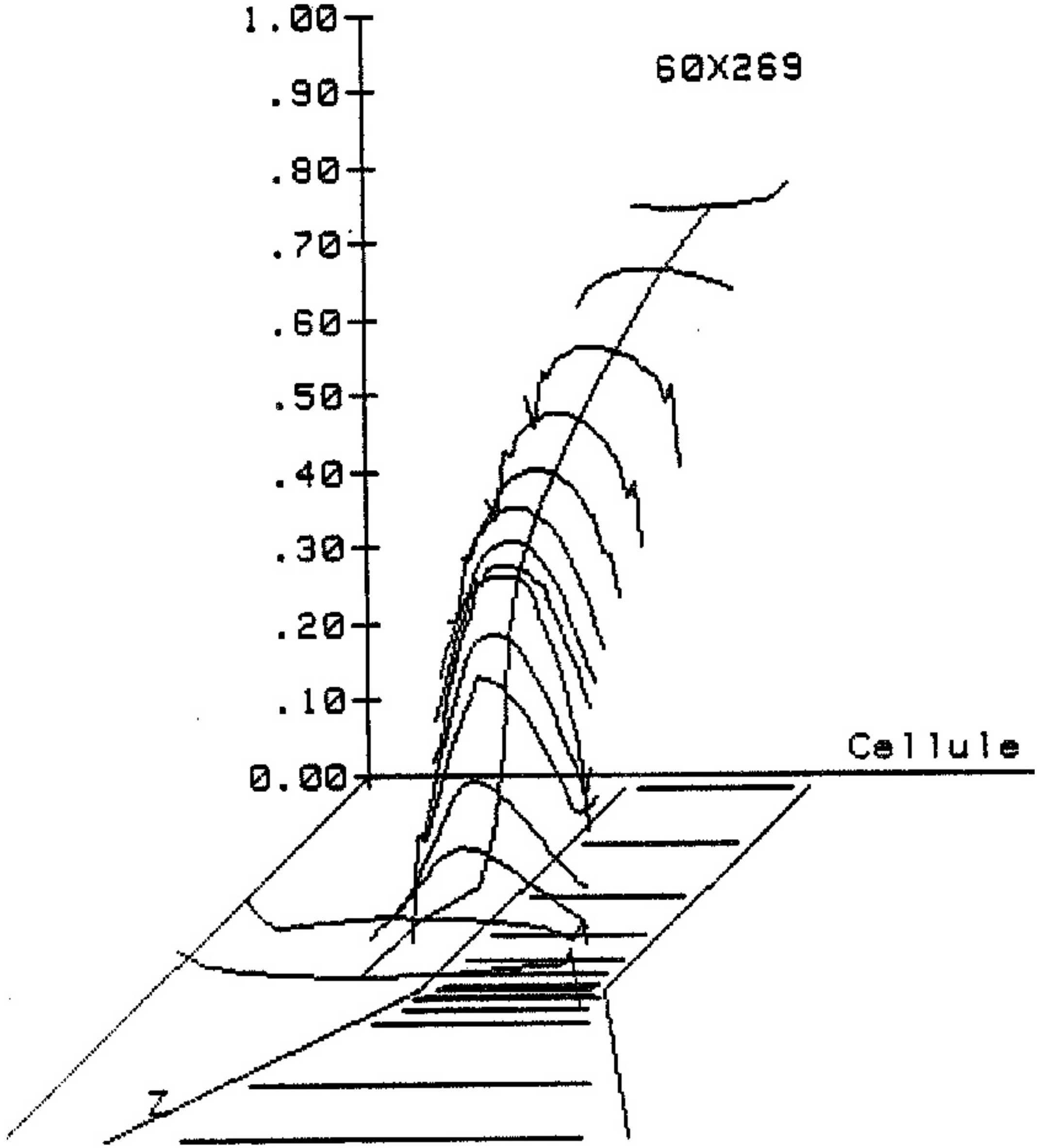
- Tomographique à rayons X

$$\overline{R_{G1}}(\theta, \phi) \Leftrightarrow \alpha_G(x, y)$$

- Diffusion de neutrons à 90 $^\circ$
- Traverse l'acier, diffusion par hydrogène
- Cinématographie.

SUPER MOBY DICK



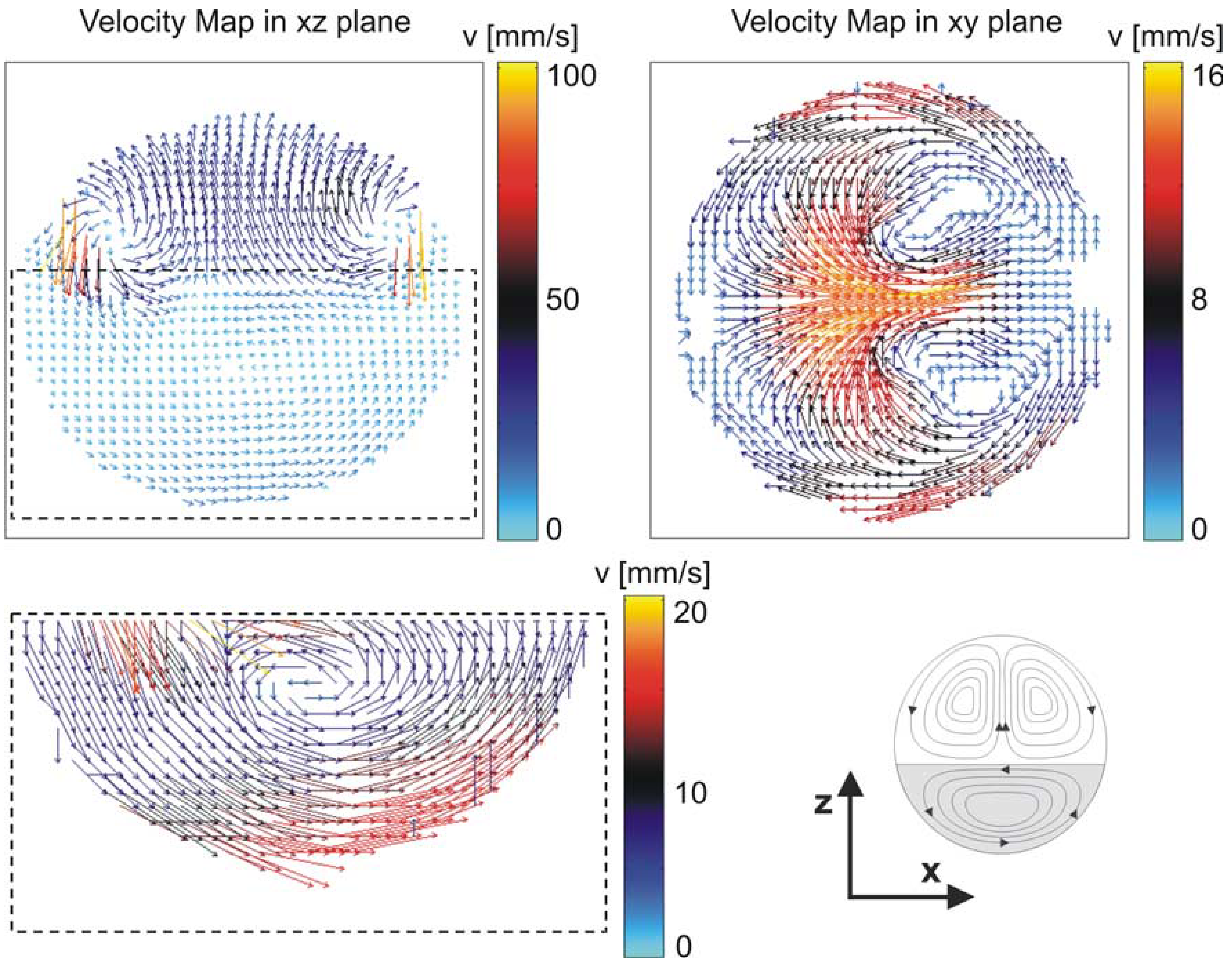


Selon les figures 63'r et 64'r
de Jeandey *et al.* (1981).
$P_0 = 59.43$ bar, $T_L = 269.2$ °C,
$P_{\text{sat}} = 54.31$ bar.

RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE

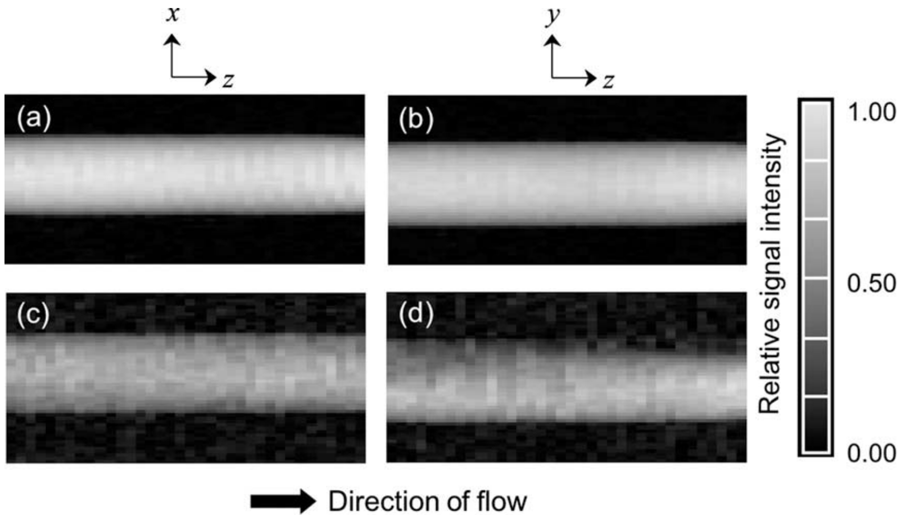
- Résonance magnétique nucléaire, RMN, imagerie par résonance (IRM)
  - Pas d'interaction mécanique avec l'écoulement,
  - Aimantation (H, F), traceur passif, champ magnétiques
  - Masse volumique moyenne (Taux de présence local), vitesses
- Résolution spatiale et temporelle
  - 0D, 1D, 2D, etc.
  - Grandeurs moyennes, filtres spatiaux arbitraires (LES).
  - Mélange et transport turbulent.
- Examen de routine, imagerie corps entier (statique), 1 mm^3, débit artériel, encore en développement pour l'imagerie en vitesse.

IMAGERIE EN VITESSE D'UNE GOUTTE EN LÉVITATION

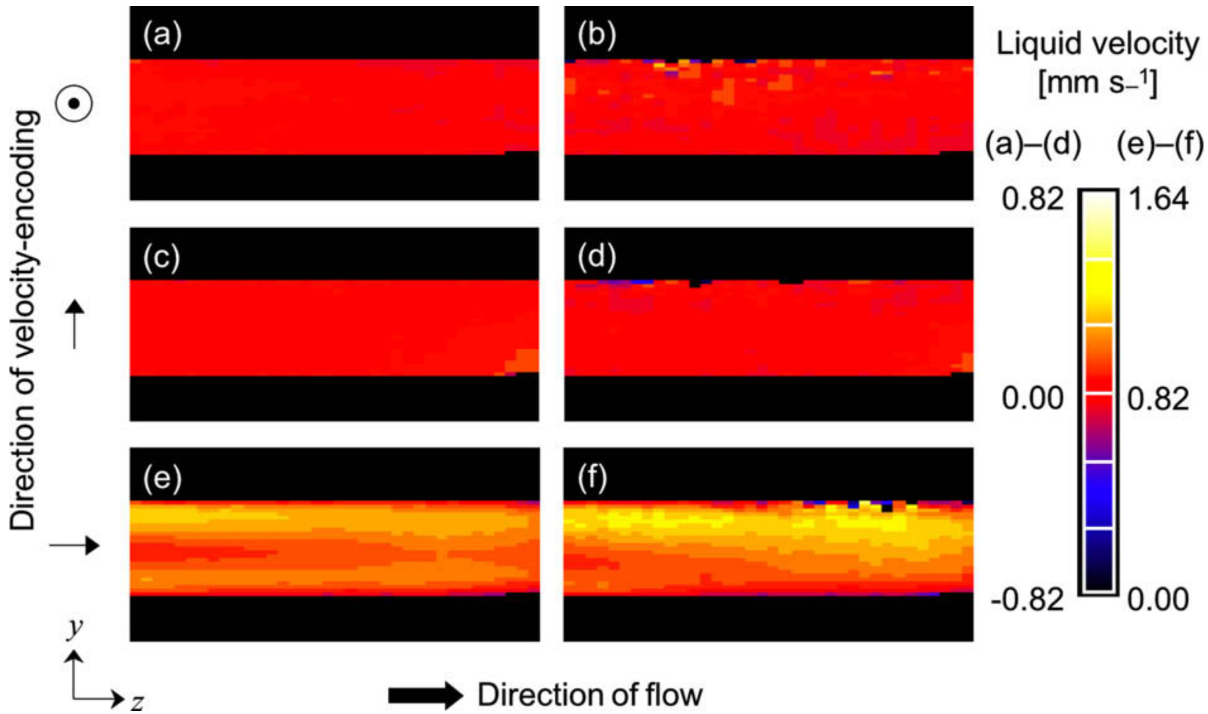


Imagerie en vitesse, d'après Amar *et al.* (2005, Fig. 13).

VITESSE ET TAUX DE PRÉSENCE (EC. BULLES)



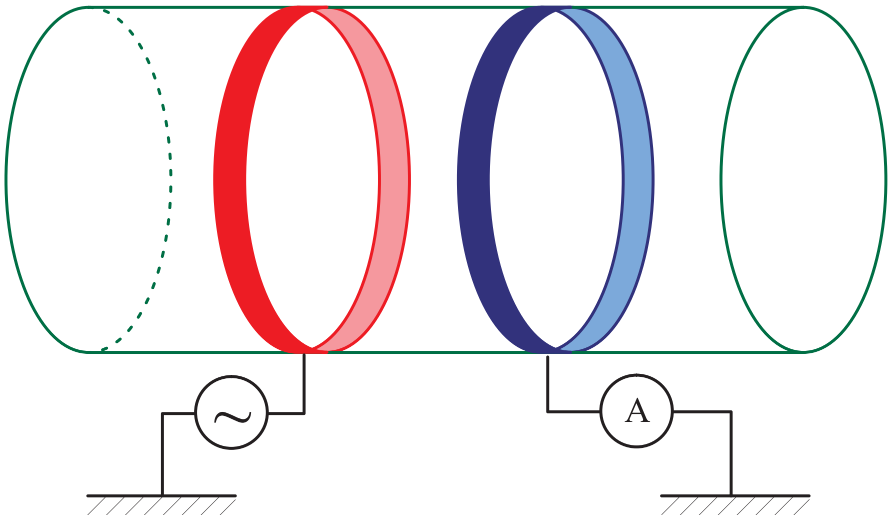
fraction liquide linéique, $\overline{R_{L1y}}$ et $\overline{R_{L1x}}$

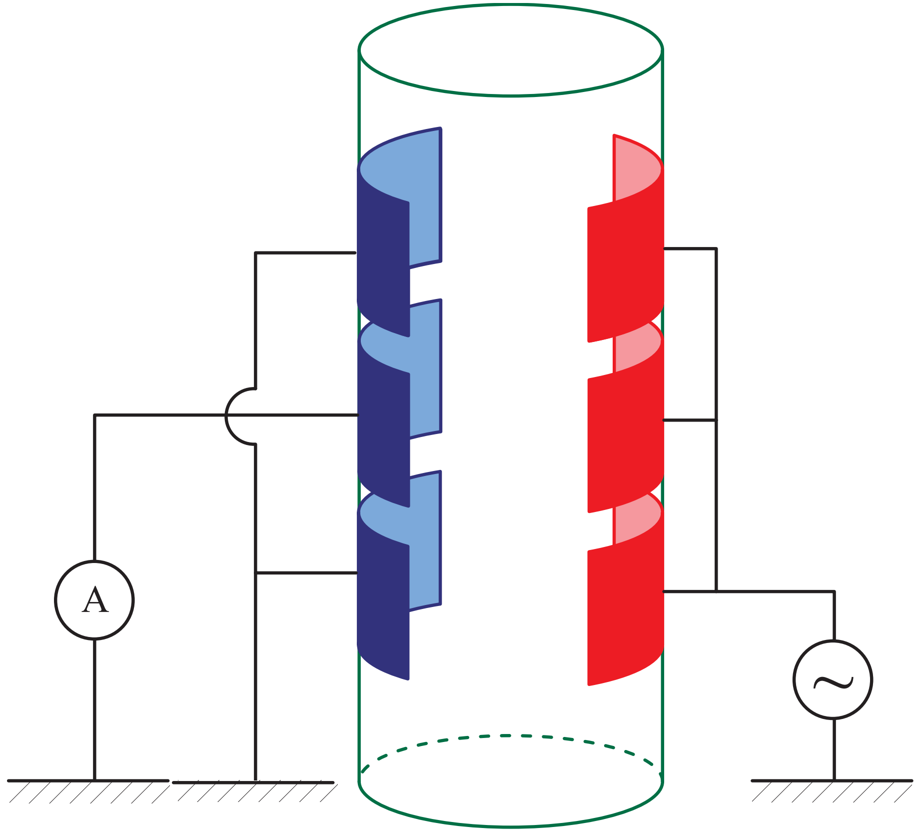


Vitesse moyenne du liquide, $\langle \overline{v_{iL}}^{X_L} \rangle_{1x}$.

Ecoulement à bulles horizontal, $D = 13.9$ mm, d'après Sankey *et al.* (2009, Figs 7 and 10).
L'échelle de vitesse est en m/s, pas en mm/s.

DENSITOMÉTRIE À IMPÉDANCE





- Impédance du milieu diphasique, excitation E, signal I.

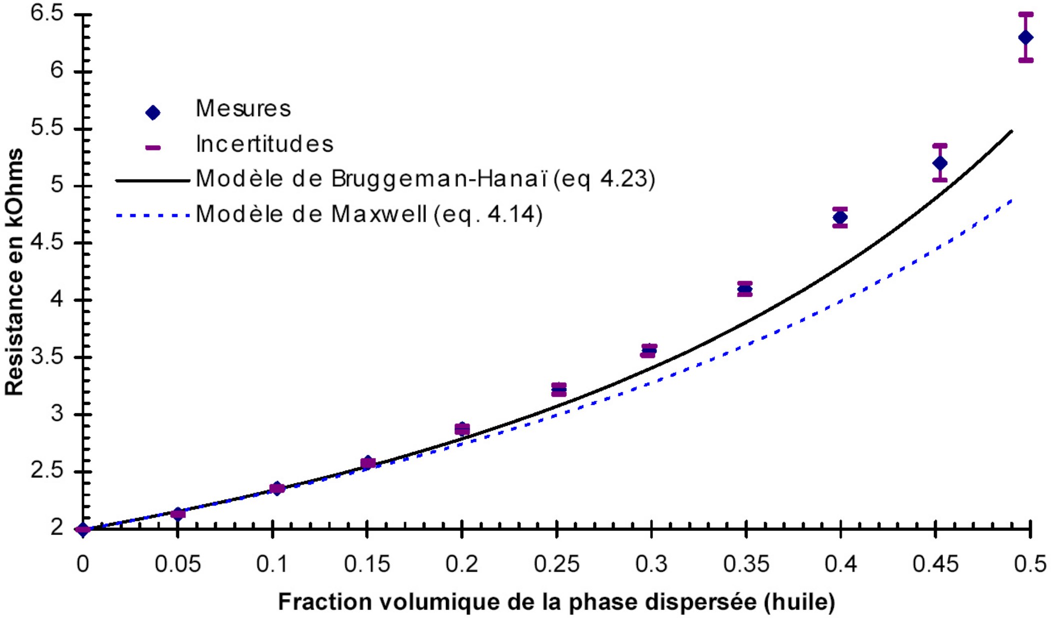
$$I = DE\sigma_C(T, c_1, c_2, \cdots)f(R_{G3}, \cdots)$$

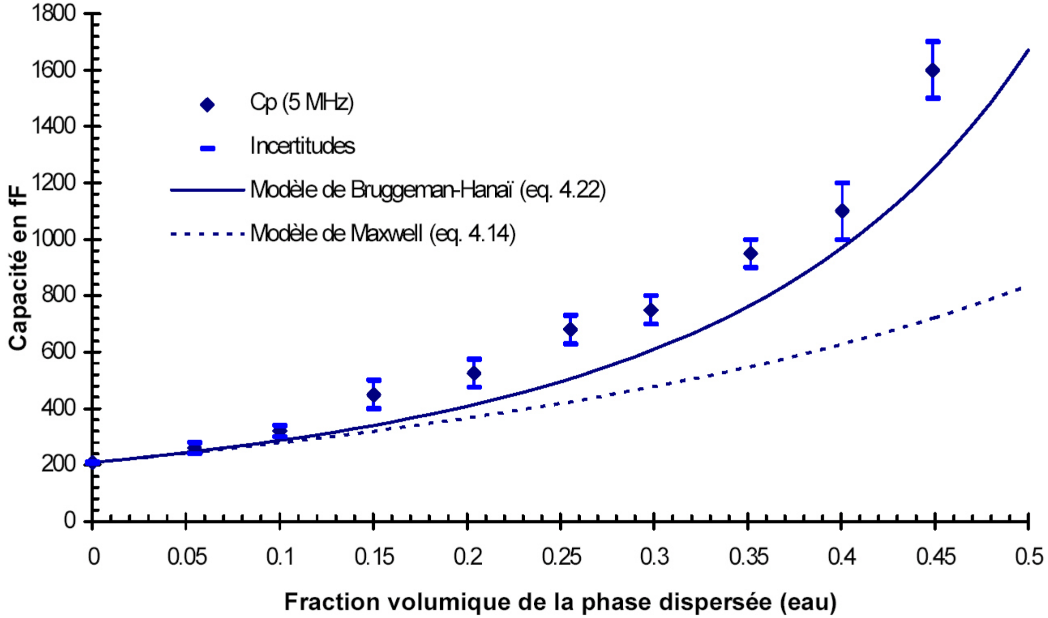
- Résistif, $\sigma_{2\phi}$, capacitif, $\epsilon_{2\phi}$, élimination effets interfaces, $10 < f < 100$ kHz

IMPÉDANCE-COMPOSITION

- Configuration électrodes : régime d'écoulement.
  - Anneaux : stratifié, réponse quasi-linéaire, conducteur 1D.
  - Électrodes face à face, réduction du volume de mesure, écoulement à bulles, ondes de densité.
- Evolution spatiale lente : $R_{G3} \approx R_{G2}(t)$
- Sensibilité en température : 1°C≈1% de taux de vide.
- Méthode de référence, élimine les effets de σ_C,
  $I \rightarrow \frac{I}{I_0}$, $I_0 = DE\sigma_C(T, c_1, c_2, \cdots)f(0)$
- Etalonnage (méthode de référence), modélisation numérique (BEM)
- Optimisation géométrique (BEM) : $f(R_{G2}, \cdots) \approx g(R_{G2})$.

ECOULEMENTS EAU-HUILE



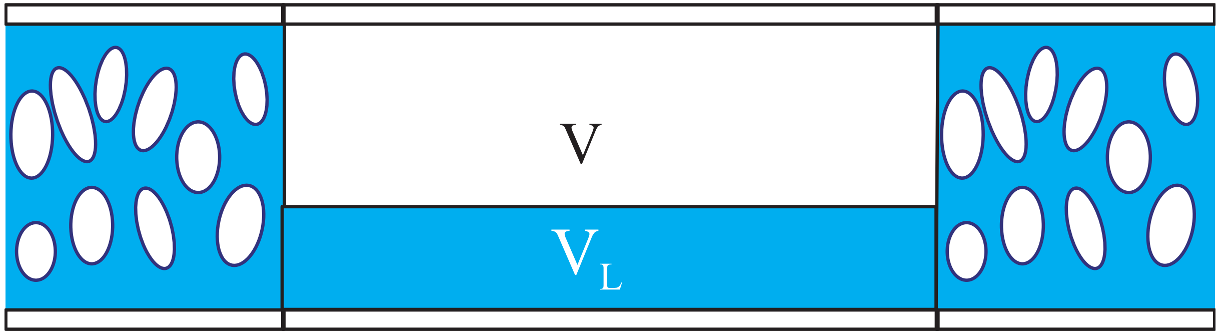


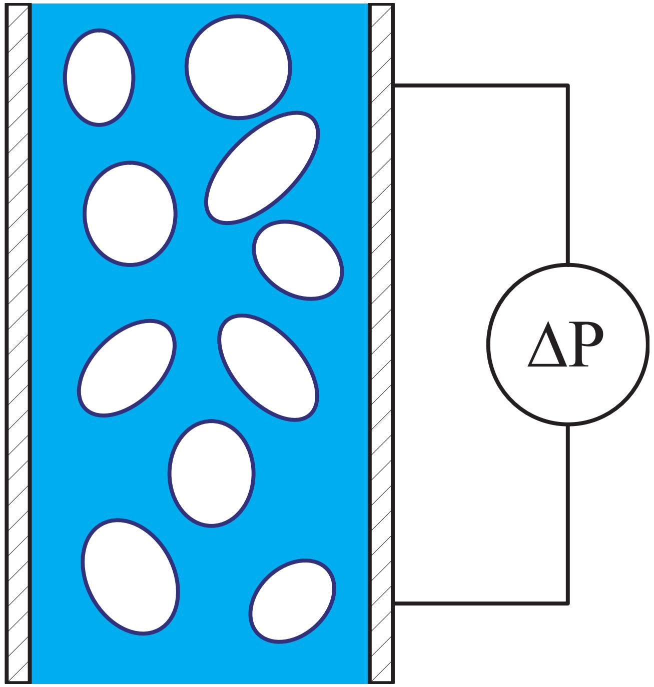
- D'après Boyer (1992, p. 98)
- Modèles théoriques, dispersion, Maxwell, Bruggemann, $\sigma_D/\sigma_C \to 0$,

$$\sigma_{2\phi} \approx \sigma_C (1 - R_{D3})^{3/2}$$

$$\epsilon_{2\phi} \approx \frac{3}{2}\epsilon_D + \left(\epsilon_C - \frac{3}{2}\epsilon_D\right)(1 - R_{D3})^{3/2}$$

FRACTION VOLUMIQUE





- Vannes à fermeture rapide, décantation :

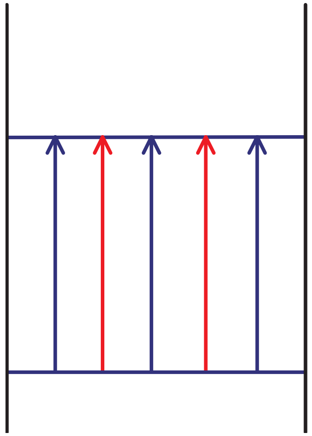
$$R_{L3} = \frac{V_L}{V}$$

- Variation de pression hydrostatique ($v_L \ll 1$ m/s)

$$\Delta p = \rho g H$$

$$\rho \triangleq \rho_G R_{G3} + \rho_L (1 - R_{G3})$$

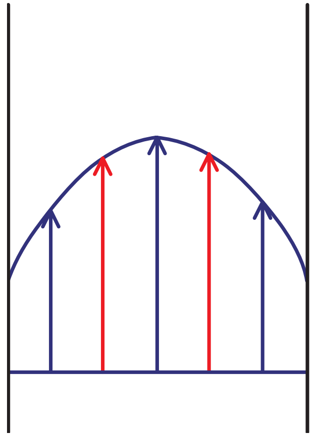
MODÈLES SIMPLES DE TAUX DE VIDE



1D-1V

Homogène

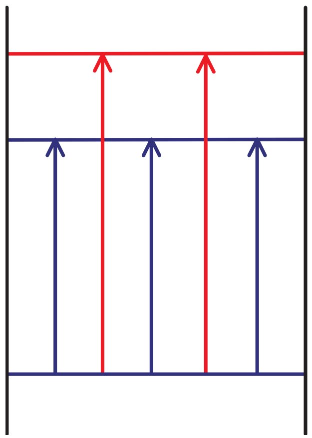
$$\overline{w}_G^X = \overline{w}_L^X = w$$



2D-1V

Bankoff

$$\overline{w}_G^X = \overline{w}_L^X = f(r)$$



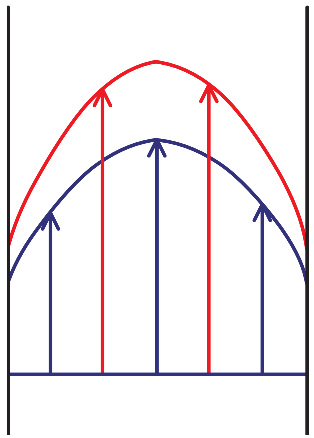
1D-2V

Wallis

$$\overline{w}_G^X = w_G$$

$$\overline{w}_L^X = w_L$$

$$w_L \neq w_G$$



2D-2V

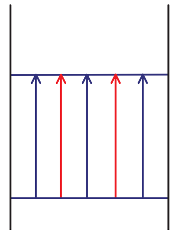
Zuber-Findlay

$$\overline{w}_G^X = f(r)$$

$$\overline{w}_L^X = g(r)$$

- Idéalisation de l'écoulement, quasi-équilibre entre phases.
- Déséquilibre mécanique : $\overline{w}_G^X \neq \overline{w}_L^X$
- Profils de vitesse.

MODÈLE HOMOGÈNE (1D-1V)



- **1D-1V**, $\overline{w}_G^X = \overline{w}_L^X = w$
  - On se donne : $\overline{Q}_G$, $\overline{Q}_L$.
  - On cherche : $\overline{R_{G2}} = \not< \alpha_G \not>_2$.
- Etablissement des 4 modèles, définition du débit moyen,

$$\overline{Q}_G \triangleq \int_{A_G} w_G \,\mathrm{d}A = \overline{A_G < w_G >_2} = A\overline{R_{G2} < w_G >_2}$$

- Commutativité des moyennes, vitesse uniforme,

$$\overline{Q}_G = A\overline{R_{G2} < w_G >_2} = A \not< \alpha_G \overline{w}_G^X \not>_2 = A\overline{R_{G2}} w_G$$

- Pour le liquide,

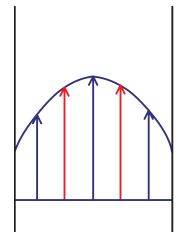
$$\overline{Q}_L = A(1 - \overline{R_{G2}}) w_L$$

- Vitesses égales,

$$\frac{\overline{Q}_G}{\overline{Q}_L} = \frac{\overline{R_{G2}}}{1 - \overline{R_{G2}}}, \qquad \boxed{\overline{R_{G2}} = \frac{\overline{Q}_G}{\overline{Q}_G + \overline{Q}_L} = \beta}$$

MODÈLE DE BANKOFF (2D-1V)

- **2D-1V,** $\overline{w}_G^X = \overline{w}_L^X = w_C\left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{m}}$, $\alpha_G = \alpha_C\left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{m}}$
- On se donne : $\overline{Q}_G$, $\overline{Q}_L$. On cherche : $\overline{R_{G2}} = \nless \alpha_G \ngtr_2$.
- Définition des débits moyen,



$$\overline{Q}_G = A \nless \alpha \overline{w}_G^X \ngtr_2 = Af(w_C, \alpha_C, m, n),\ \overline{Q}_L = A \nless (1-\alpha)\overline{w}_L^X \ngtr_2 = Ag(w_C, \alpha_C, m, n)$$

- Calcul des vitesses et taux de présence moyens,

$$\nless \overline{w}_L^X \ngtr_2 = h(w_C, m), \quad \overline{R_{G2}} = k(\alpha_C, n)$$

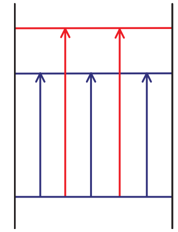
- On élimine α_C et w_C,

$$\boxed{\overline{R_{G2}} = K\beta}, \quad K = \frac{2(m+n+mn)(m+n+2mn)}{(n+1)(2n+1)(m+1)(2m+1)}, \quad K = 0,6 \div 1,\ 2 \leqslant m, n \leqslant 7$$

- Corrélation de Bankoff, eau vapeur (p en bar),

$$K = 0,71 + 0,00145p$$

MODÈLE DE WALLIS (1D-2V)



- **1D-2V,** $\quad \overline{w}_G^X = w_G, \quad \overline{w}_L^X = w_L, \quad \alpha_G(r) = \alpha_G, \quad w_G \neq w_L$
- On se donne: $\overline{Q}_G$, $\overline{Q}_L$. On cherche : $\overline{R_{G2}} = \lessdot \alpha_G \gtrdot_2$
- Définition des débits moyens,

$$\overline{Q}_G = A \lessdot \alpha \overline{w}_G^X \gtrdot_2 = A \overline{R_{G2}} w_G$$

$$\overline{Q}_L = A \lessdot (1-\alpha) \overline{w}_L^X \gtrdot_2 = A (1 - \overline{R_{G2}}) w_L$$

- On calcule le taux de présence moyen,

$$\overline{R_{G2}} = \frac{\overline{Q}_G w_L}{\overline{Q}_L w_G + \overline{Q}_G w_L} = \boxed{\frac{\beta}{1 + \dfrac{(1-\overline{R_{G2}})(w_G - w_L)}{J}}}$$

- Ex. fermeture, écoulement à bulles, w_∞, vitesse ascension, isolée (Clift *et al.* , 1978)

$$w_G - w_L = w_\infty (1 - \overline{R_{G2}}), \quad w_\infty = f(D, \sigma, \rho_L, \rho_G, \mu_L, \cdots)$$

- Diagramme de Wallis (Wallis, 1969), colones à bulles, analogie transferts de masse.

DIAGRAMME DE WALLIS

- Flux volumique :

$$j_k \triangleq \alpha_k \overline{w}_k^X = \overline{X_k w_k}, \quad j = j_1 + j_2$$

- Vitesse de dérive : vitesse relative au centre de volume,

$$v_{kj} \triangleq \overline{w}_k^X - j$$

- Flux de dérive, densité de flux par rapport au centre de volume,

$$j_{GL} = \alpha_G(\overline{w}_k^X - j)$$

- Hypothèse 1D :

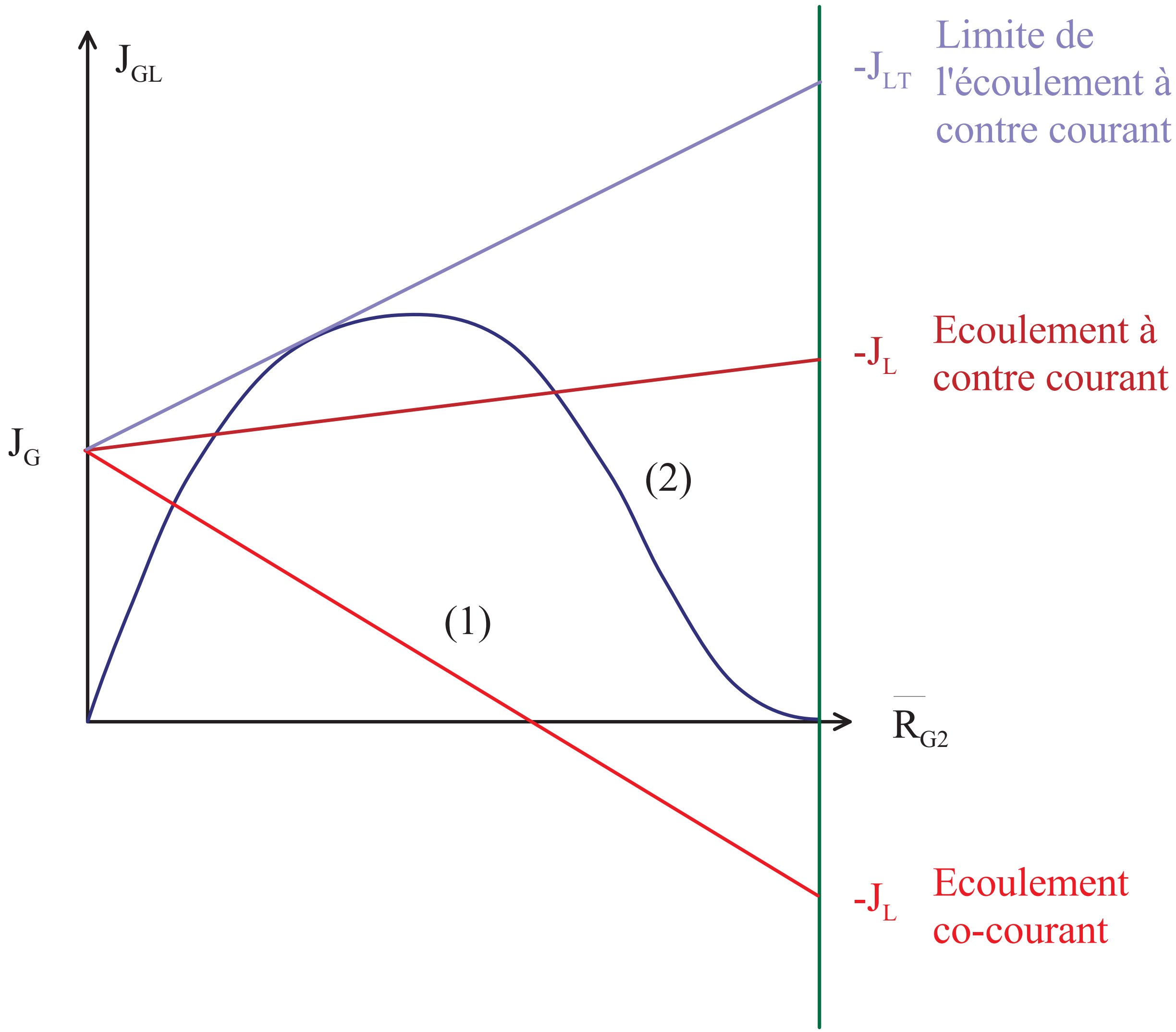
$$J_{GL} = \langle\!\langle j_{GL} \rangle\!\rangle_2 = \overline{R_{G2}}(w_G - J) = (1 - \overline{R_{G2}})J_G - \overline{R_{G2}}J_L \tag{1}$$

- Définition : $J = J_G + J_L = \overline{R_{G2}}w_G + (1 - \overline{R_{G2}})w_L$,

$$J_{GL} = \overline{R_{G2}}(1 - \overline{R_{G2}})(w_G - w_L) = w_\infty \overline{R_{G2}}(1 - \overline{R_{G2}})^2 \tag{2}$$

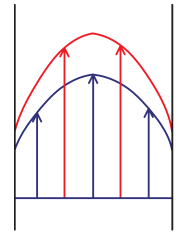
- Corrélation pour les écoulements à bulles (fermeture), mousses.

DIAGRAMME DE WALLIS



- Co-courant J_L et $J_G > 0$, 1 point de fonctionnement.
- Contre-courant $J_L < 0$, 2 états possibles.
- Limite de l'écoulement à contre-courant, $J_L < -J_{LT}$.

MODÈLE DE ZUBER & FINDLAY (2D-2V)



- **2V-2D**. On se donne : $\overline{Q}_G$, $\overline{Q}_L$. On cherche : $\overline{R_{G2}} = \langle\!\langle \alpha_G \rangle\!\rangle_2$,
- Définition de la vitesse de dérive locale,

$$\overline{w}^X_{Gj} = \overline{w}^X_G - j = (1-\alpha_G)(\overline{w}^X_G - \overline{w}^X_L)$$

- On calcule le flux de dérive sur la section,

$$\langle\!\langle \alpha_G \overline{w}^X_{Gj} \rangle\!\rangle_2 = \langle\!\langle \alpha_G \overline{w}^X_G \rangle\!\rangle_2 - \langle\!\langle \alpha_G j \rangle\!\rangle_2$$

- Nouvelles inconnues :

$$\widetilde{w}_{GJ} = \frac{\langle\!\langle \alpha_G \overline{w}^X_{Gj} \rangle\!\rangle_2}{\langle\!\langle \alpha_G \rangle\!\rangle_2}, \quad C_0 = \frac{\langle\!\langle \alpha_G j \rangle\!\rangle_2}{\langle\!\langle \alpha_G \rangle\!\rangle_2 \langle\!\langle j \rangle\!\rangle_2}$$

- Modèle de Zuber & Findlay (dégénère sur les modèles précédents)

$$\boxed{\overline{R_{G2}} = \frac{J_G}{C_0 J + \widetilde{w}_{GJ}}} = \frac{\beta}{C_0 + \frac{\widetilde{w}_{GJ}}{J}}$$

- Diagramme de Zuber & Findlay : $\frac{J_G}{R_G} = C_0 J + \widetilde{w}_{GJ}$

FERMETURES DU MODÈLE DE ZUBER & FINDLAY

- Fermetures : C_0, pente, $\widetilde{w}_{GJ}$, ordonnée à l'origine. Dépend du régime d'écoulement (Ishii, 1977).
- Comprendre $\overline{R_{G2}} \to R_G$,

$$C_0 = \left(1,2 - 0,2\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}\right) \underbrace{(1 - \exp(-18 R_G))}_{\text{ébullition}}$$

- Ecoulements à bulles :

$$\widetilde{w}_{GJ} = (C_0 - 1)J + 1,4 \left(\frac{\sigma g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2}\right)^{1/4} (1 - R_G)^{7/4}$$

- Ecoulements à poches :

$$\widetilde{w}_{GJ} = (C_0 - 1)J + 0,35 \left(\frac{gD(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L}\right)^{1/2}$$

FERMETURES DU MODÈLE DE ZUBER & FINDLAY

- Ecoulements agités :

$$\widetilde{w}_{GJ} = (C_0 - 1)J + 1,4\left(\frac{\sigma g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2}\right)^{1/4}$$

- Ecoulements annulaires :

$$\widetilde{w}_{GJ} = \frac{1 - R_G}{R_G + \left(\frac{1+75(1-R_G)}{\sqrt{R_G}}\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{1/2}}\left(\sqrt{\frac{gD(\rho_L - \rho_G)(1 - R_G)}{0,015\rho_L}}\right)$$

POUR EN SAVOIR PLUS

- Les modèles de taux de vide : Delhaye (2008)
- Les modèles de dérive, (*drift-flux*) : Wallis (1969)
- Pour les fermetures : Ishii (1977), voir aussi Ishii & Hibiki (2006).

REFERENCES

Amar, A., Gross-Hardt, E., Khrapitchev, A A, Stapf, S, Pfennig, A, & Bluemich, B. 2005. Visualizing flow vortices inside a single levitated drop. *J Mag. Res.*, **177**, 74–85.

Bensler, H. P. 1990. *Détermination de l'aire interfaciale du taux de vide et du diamètre moyen de Sauter dans un écoulement à bulles à partir d'un faisceau d'ultrasons*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

Boyer, Ch. 1992. *Etude d'un procédé de mesure des débits d'un écoulement triphasique de type eau-huile-gaz*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

Clift, R., Grace, J. R., & Weber, M. E. 1978. *Bubbles, drops, and particles*. Academic Press Inc.

Delhaye, J.-M. 2008. *Thermohydraulique des réacteurs nucléaires*. Collection génie atomique. EDP Sciences. Chap. 7-Modélisation des écoulements diphasiques en conduite, pages 231–274.

Ishii, M. 1977. *One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes*. Tech. rept. 77-47. Argonne Nat. Lab., USA.

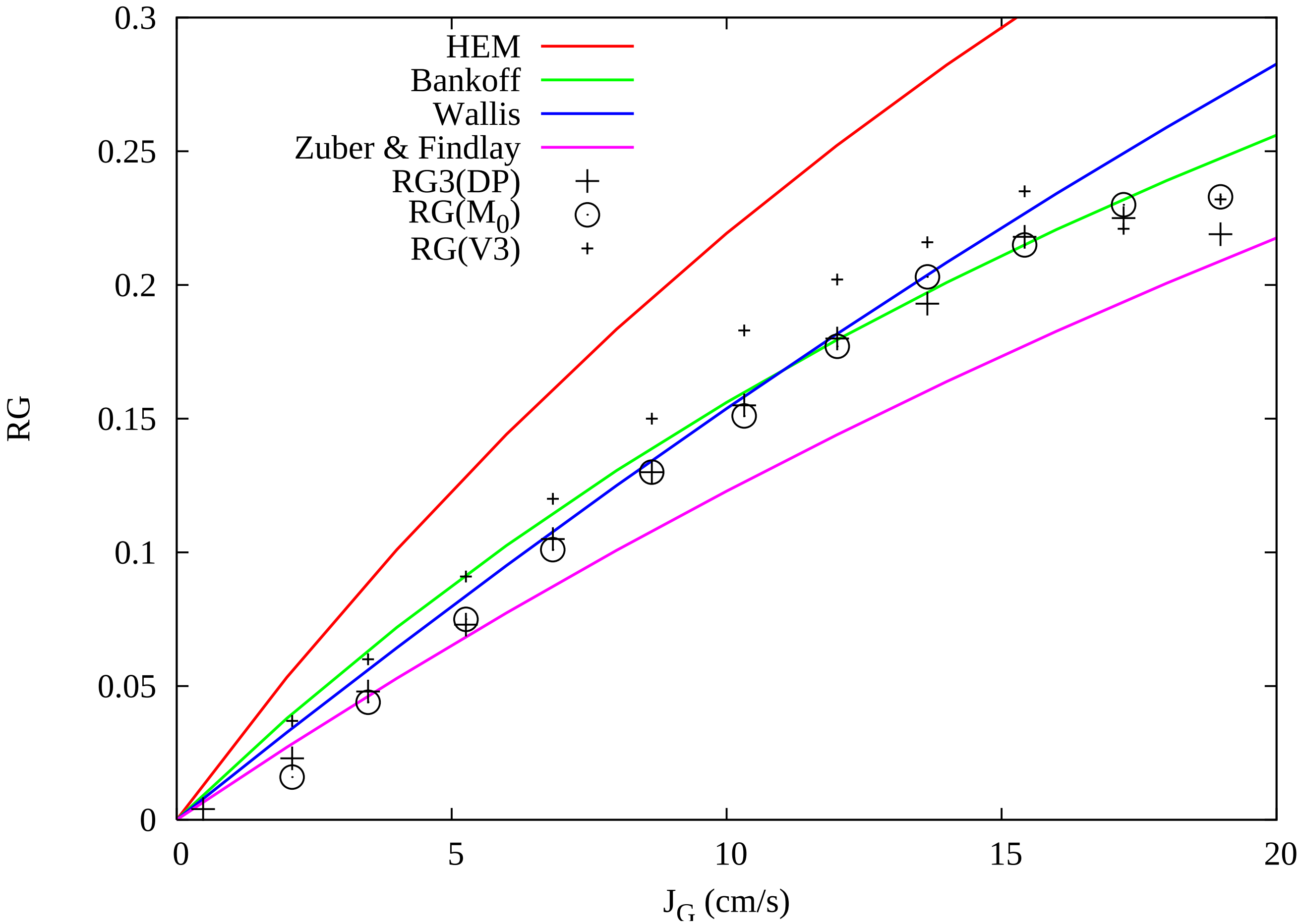
Ishii, M., & Hibiki, T. 2006. *Thermo-fluid dynamics of two-phase flows*. Springer.

Jeandey, Ch., Gros d'Aillon, L., Bourgine, R., & Barrierre, G. 1981. *Autovaporisation d'écoulements eau-vapeur*. Tech. rept. (R)TT 163. CEA/Grenoble, Grenoble, France.

Sankey, M., Yang, Z., Gladden, L., Johns, M. L., & Newling, D. Listerand B. 2009. SPRITE MRI of bubbly flow in a horizontal pipe. *J. Mag. Res*, **199**, 126–135.

Wallis, G. B. 1969. *One dimensional two-phase flow*. McGraw-Hill.

SUGGESTION D'APPROFONDISSEMENT



Objectif du travail personnel : mettre en oeuvre les modèles de taux de vide sur des données expérimentales. Construire le diagramme de Wallis et Zuber & Findlay.