

UNE INTRODUCTION AUX ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES

Occurrence industrielle
et régimes d'écoulement

HERVE LEMONNIER

DER/SSTH, CEA/Grenoble, 38054 Grenoble Cedex 9

Tél. 04 38 78 45 40

herve.lemonnier@cea.fr, herve.lemonnier.sci.free.fr/TPF/TPF.htm

2007-2008

SOMMAIRE DU COURS (1/2)

- Introduction : le CEA/Grenoble, l'information scientifique
- Les systèmes diphasiques dans l'industrie et la nature
- Les configurations d'écoulement diphasiques
- Les techniques de mesure du taux de vide (α)
- Les premiers modèles de calcul du taux de vide

SOMMAIRE DU COURS (2/2)

- Les équations de bilan
- Les modèles monodimensionnels (1D)
- Les pertes de pression par frottement
- Les mécanismes de transferts de chaleur en ébullition
- La condensation de vapeur pure
- ...

LA THERMOHYDRAULIQUE

- Etude des transferts des écoulements et des transferts de chaleur (couplés), de l'anglais *thermal-hydraulics*
- Phase : état de la matière caractérisé par des propriétés thermodynamique distinctes
- Diphasique : qui comprend un mélange de deux phases (*two-phase flow*)
- Exemple : l'eau et l'air, l'huile et l'eau, l'eau et sa vapeur, le pétrole brut (polyphasique, *multiphase flows*).

LE CEA/GRENOBLE

- CEA : Commissariat à l'Energie Atomique (15000 p)
- CEA/Grenoble : créé en 1956 par Louis Néel (4000p/2300 CEA)
- Le Service des Transferts Thermiques créé par Henri Mondin
- La Direction de l'énergie nucléaire (5000 p)
- Le Département d'études des réacteurs (400 p, Cadarache, Grenoble)
- Le Service de simulation en thermohydraulique (SSTH)
- Le Service d'études expérimentales en thermohydraulique (SE2T)
- Equipes d'accueil pour le Master EP

SERVICE DE SIMULATION EN THERMOHYDRAULIQUE

- Analyse de la sûreté des réacteurs (CATHARE).
- Ecoulements diphasiques bouillants 3D (Neptune).
- Ecoulements monophasiques, diphasiques, 3D avec transferts de chaleur (TRIO-U).
- Mise au point et qualification des outils, expériences et développement d'instrumentation.
- Etudes : Réacteurs Nucléaires de seconde, troisième, quatrième générations, propulsion navale. Propulsion cryogénique.

L'INFORMATION SCIENTIFIQUE

- Comment résoudre un problème technique ?
- Les livres, les revues (périodiques) : les bibliothèques.
- Les sociétés scientifiques : éditent les revues, organisent des manifestations (actes, *proceedings*).
 - La Société française de l'énergie nucléaire
 - La Société hydrotechnique de France
 - La Société française de thermique
 - L'American nuclear society, thermal-hydraulics division (NURETH)
- L'anglais ...

SYSTEMES DIPHASIQUES INDUSTRIELS ET NATURELS (1/4)

- Génie nucléaire (dimensionnement, sûreté, assainissement)
 - Perte de réfrigérant primaire (APRP-*LOCA*)
 - Accidents graves en et hors cuve
 - Décontamination par mousse
 - Retraitement des déchets
- Génie pétrolier : production diphasique
 - Transport
 - Pompage
 - Comptage (débitmétrie)
 - Procédés de raffinage
- Génie pétrolier : sûreté
 - Sûreté des installations
 - Stockage des hydrocarbures

SYSTEMES DIPHASIQUES INDUSTRIELS ET NATURELS (2/4)

- Génie chimique
 - Traitement des eaux (aire interfaciale et temps de séjour)
 - Contacteurs gaz-liquide (film ruisselant, air-lift)
 - Mélange et séparation
 - Sûreté : emballement thermique
- Automobile
 - Atomisation carburant diesel
 - Combustion moteur diesel
 - Erosion de cavitation : direction, injecteurs
- Thermique industrielle
 - Echangeurs de chaleur : évaporateurs, condenseurs
 - Chaudières (flux critique)

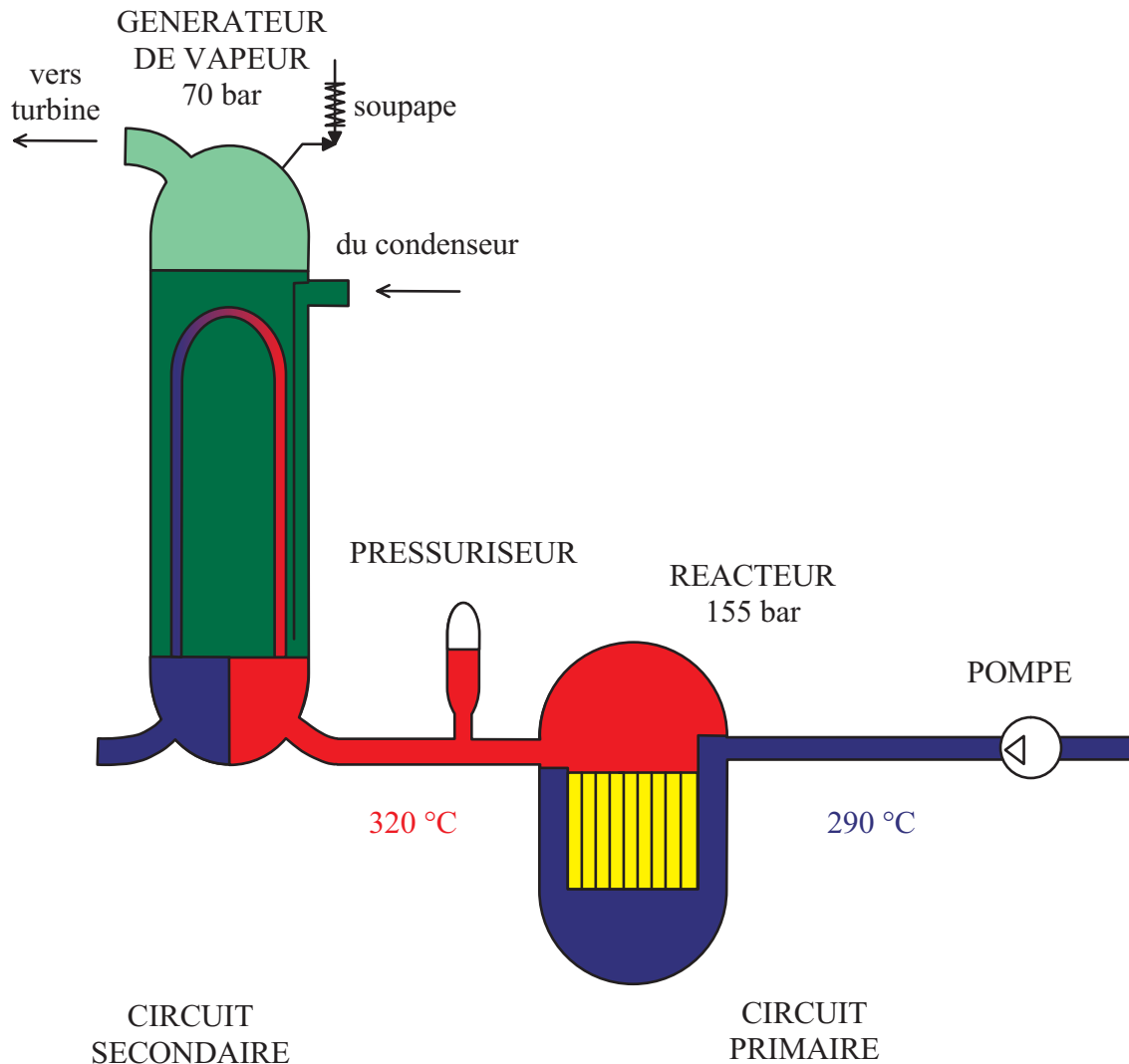
SYSTEMES DIPHASIQUES INDUSTRIELS ET NATURELS (3/4)

- Aménagements hydrauliques, eau/eaux usées
 - Transitoires de remplissage des ouvrages de distribution des eaux
 - Amorçage des siphons
- Espace
 - Stockage des ergols cryogéniques
 - Refroidissement des moteurs cryogéniques
 - Coups de bélier
 - Cavitation des turbopompes

SYSTEMES DIPHASIQUES INDUSTRIELS ET NATURELS (4/4)

- Météorologie
 - Mécanique des orages, nuages de pluie et orages
 - Echanges océan-atmosphère, formation des aérosols
- Vulcanologie
 - Ecoulement de lave critique dans la cheminée
 - Explosion de vapeur
 - Nuées ardentes (Vésuve)
- Nivologie
 - Avalanches
 - Maturation de la neige (triphasique)

REACTEUR NUCLEAIRE



- Dimensionnement :
 - GV : échanges diphasiques et pertes de charge
 - RTGV : écoulement critique soupape
 - IFS : sollicitations et dispositifs anti vibrations
- Sûreté :
 - Perte de réfrigérant primaire (LOCA), température des gaines, scénario dimensionnant
- Décontamination :
 - Cuve, GV, minimisation des effluents : mousse

COMBUSTIBLE NUCLEAIRE



- Pastilles combustibles
- Crayon ≈ 10 mm de diamètre (première barrière de confinement)
- Assemblage 17×17
- Barres de contrôle
- Longueur ≈ 4 mètres
- Coeur ≈ 4 m de diamètre
- Echange par convection forcée
- Puissance $3000 \div 5000$ MW

GENERATEUR DE VAPEUR



- Echangeur tubulaire primaire/secondaire (seconde barrière de confinement)
- ≈ 5000 tubes de 50 mm de diamètre, longueur 10 m
- Pression 155bar-70 bar
- 3 ou 4 GV et autant de boucles
- Tubes en U inversé (chignon)
- Ecoulement diphasique au secondaire
- Echanges thermiques et vibrations

QUELQUES CHIFFRES : LE PALIER N4

- Circuit primaire pression 155 bar, $T_{\text{sat}} \approx 355^{\circ}\text{C}$. Puissance thermique 4250 MW.
 - Débit massique : 4928,6 kg/s par GV (4)
 - Température d'entrée : $292,2^{\circ}\text{C}$
 - Température de sortie : $329,6^{\circ}\text{C}$
- Circuit secondaire, pression sortie GV : 72,3 bar
 - Température vapeur : 288°C
 - Température d'eau alimentaire : $229,5^{\circ}\text{C}$
 - Débit massique moyen : 601,91 kg/s par GV (4)
- Vérification du bilan thermique

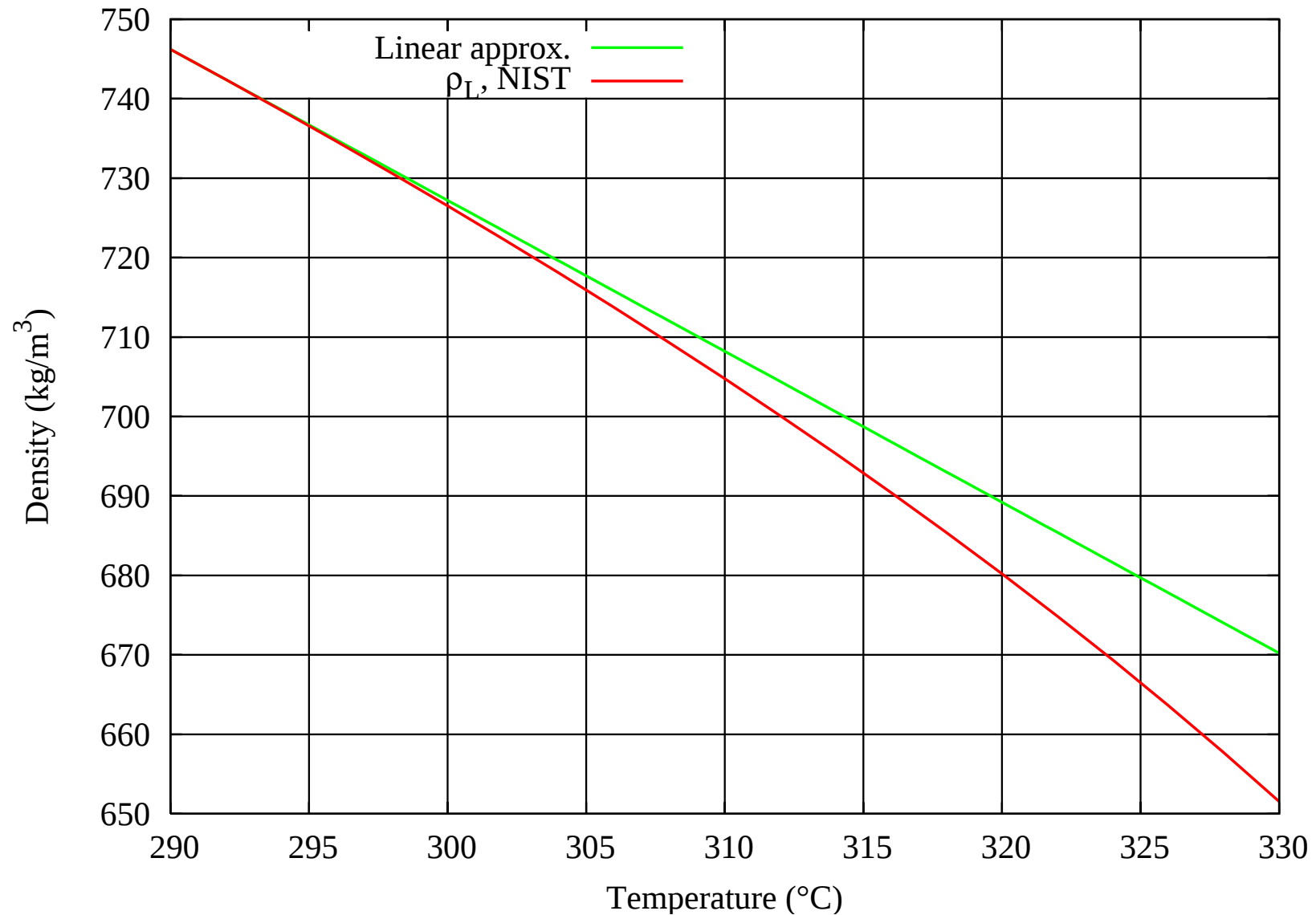
Source : National Institute of Standards and Technology (NIST)
(<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>)

QUELQUES MAUVAISES NOUVELLES

Les propositions suivantes sont souvent *assez* fausses :

- Le bilan de masse s'écrit $Q_1 = Q_2$ car l'eau est incompressible, voire faiblement dilatable.
- L'enthalpie d'un fluide est donnée par $h = C_P T$.
- Pour un liquide $C_P \approx C_V$ ou $h \approx u$.
- La vapeur est un gaz parfait.

MASSE VOLUMIQUE DE L'EAU À 155 BAR



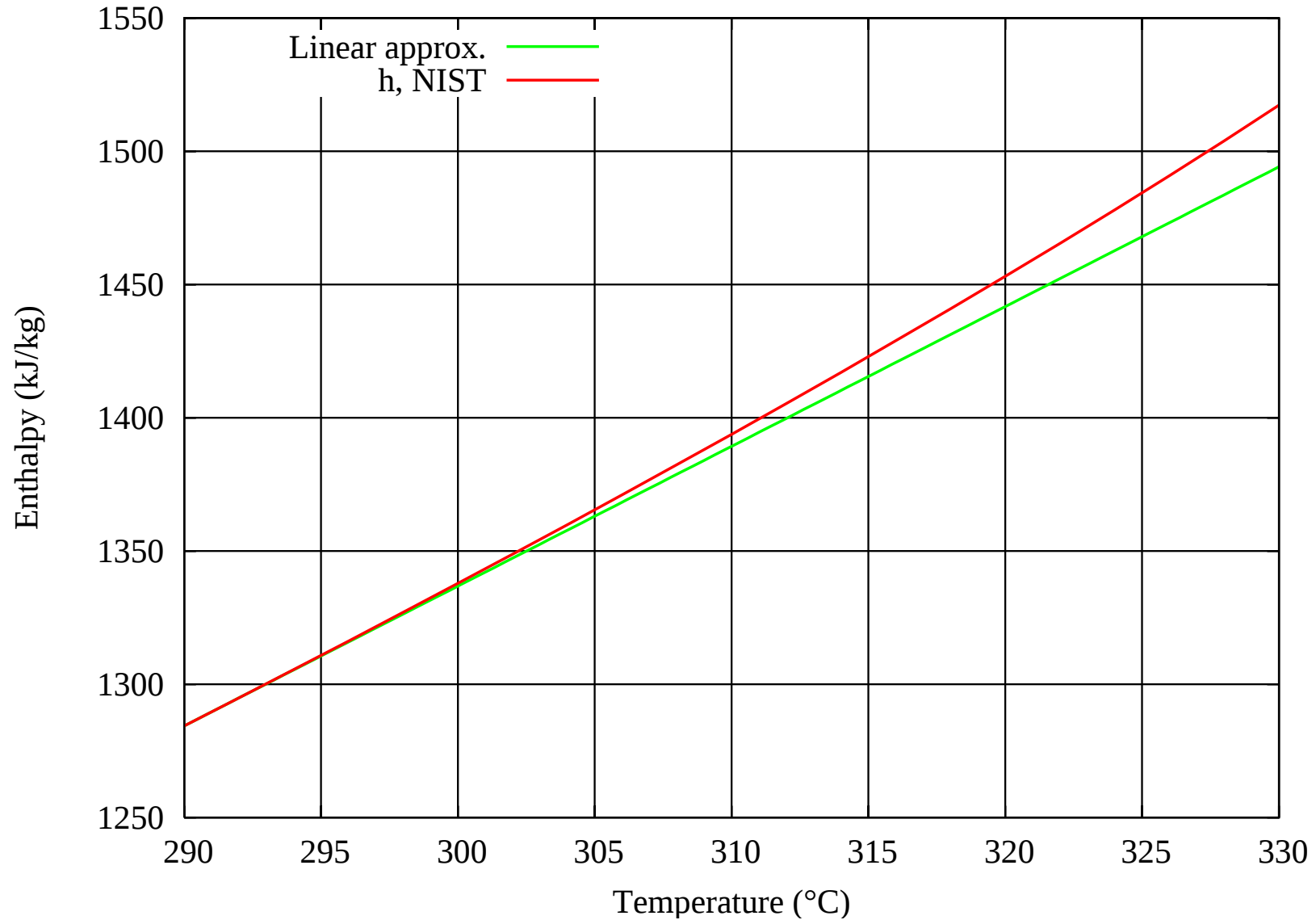
BILAN DE MASSE DU PRIMAIRE

- Débit masse par boucle (BF), $M_L \approx 5023 \text{ kg/s}$
- Masse volumique à l'entrée : $\rho_{L1}(292^\circ\text{C}, 155 \text{ bar}) = 742,41 \text{ kg/s}$.
- Masse volumique à la sortie : $\rho_{L2}(330^\circ\text{C}, 155 \text{ bar}) = 651,55 \text{ kg/s}$.

$$Q_1 = \frac{M_L}{\rho_1} = 6,77 \text{ m}^3/\text{s}, \quad Q_2 = \frac{M_L}{\rho_2} = 7,71 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Soit 13% d'écart environ, volume du primaire 400 m³environ.

ENTHALPIE DE L'EAU À 155 BAR



BILAN D'ÉNERGIE DU PRIMAIRE

- Débit masse par boucle (BF), $M_L \approx 5023 \text{ kg/s}$
- Enthalpie à l'entrée : $h_{L1}(292^\circ\text{C}, 155\text{bar}) = 1295 \text{ kJ/kg}$
- Enthalpie à la sortie : $h_{L2}(330^\circ\text{C}, 155 \text{ bar}) = 1517 \text{ kJ/kg}$.

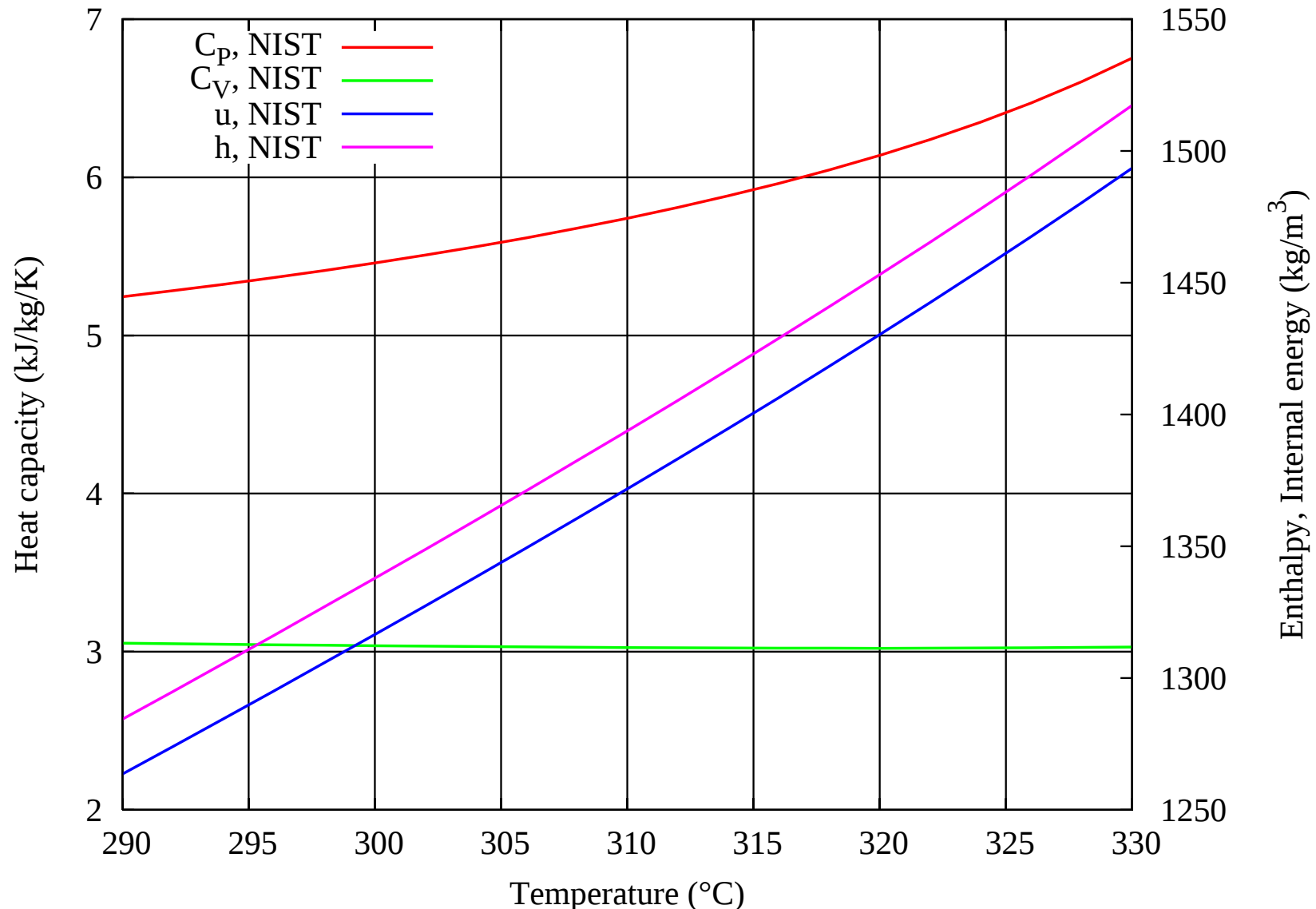
$$P = M_L \Delta h \approx 5023 \times 222 \cdot 10^3 = 1115 \text{ MW}$$

- Soit 4460 MW pour le réacteur.
- Approximation, $h = C_P T$, $C_P(292^\circ\text{C}, 155\text{bar}) = 5,2827 \text{ kJ/kg/K}$

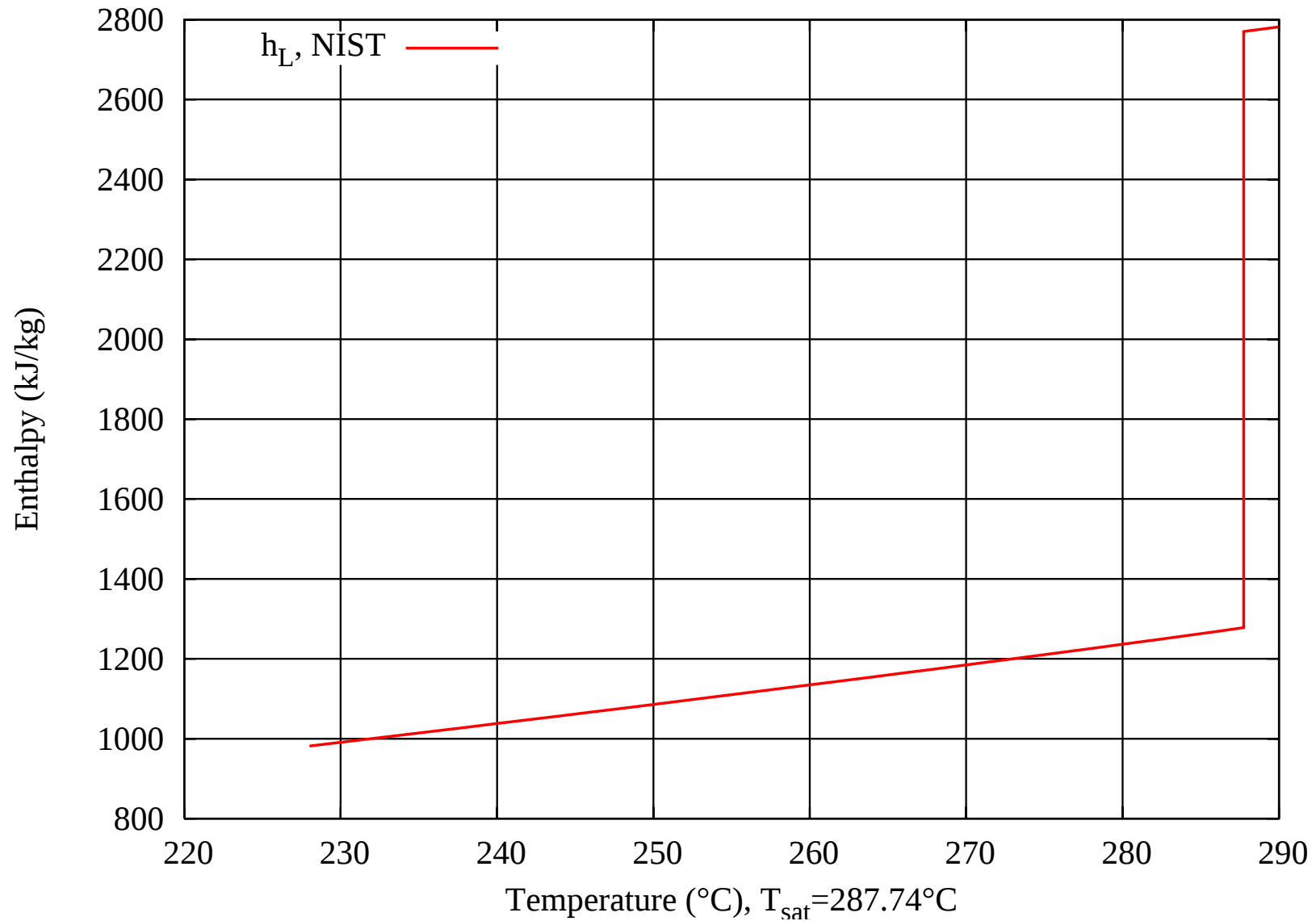
$$P = M_L C_P \Delta T \approx 5023 \times 201 \cdot 10^3 = 1008 \text{ MW}$$

- Soit 10% d'écart environ. Ecart de température : 31°C/heure

ENTHALPIE, ÉNERGIE INTERNE DE L'EAU À 155 BAR



ENTHALPIE DE L'EAU À 72 BAR



BILAN D'ÉNERGIE DU SECONDAIRE

- Débit masse par boucle (BF), $M_L \approx 602 \text{ kg/s}$
- Enthalpie à l'entrée : $h_{L1}(230^\circ\text{C}, 72\text{bar}) = 991.1 \text{ kJ/kg}$
- Enthalpie à la sortie : $h_{V2}(288^\circ\text{C}, 72 \text{ bar}) = 2771 \text{ kJ/kg}$.

$$P = M_L \Delta h \approx 602 \times 1780 \text{ } 10^3 = 1071 \text{ MW}$$

- A comparer à 1115 MW pour le primaire .

LA VAPEUR EST UN GAZ PARFAIT

- A 100°C, 1 bar, $\rho_V = 0,5897 \text{ kg/m}^3$.
- Gaz parfait : $pV = RT$, $R = 8,316 \text{ J/mol/K}$, $M = 18 \text{ g/mol}$.

$$V = \frac{RT}{p} = 3,103 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3, \quad \rho = \frac{M}{V} = 0,5801 \text{ kg/m}^3.$$

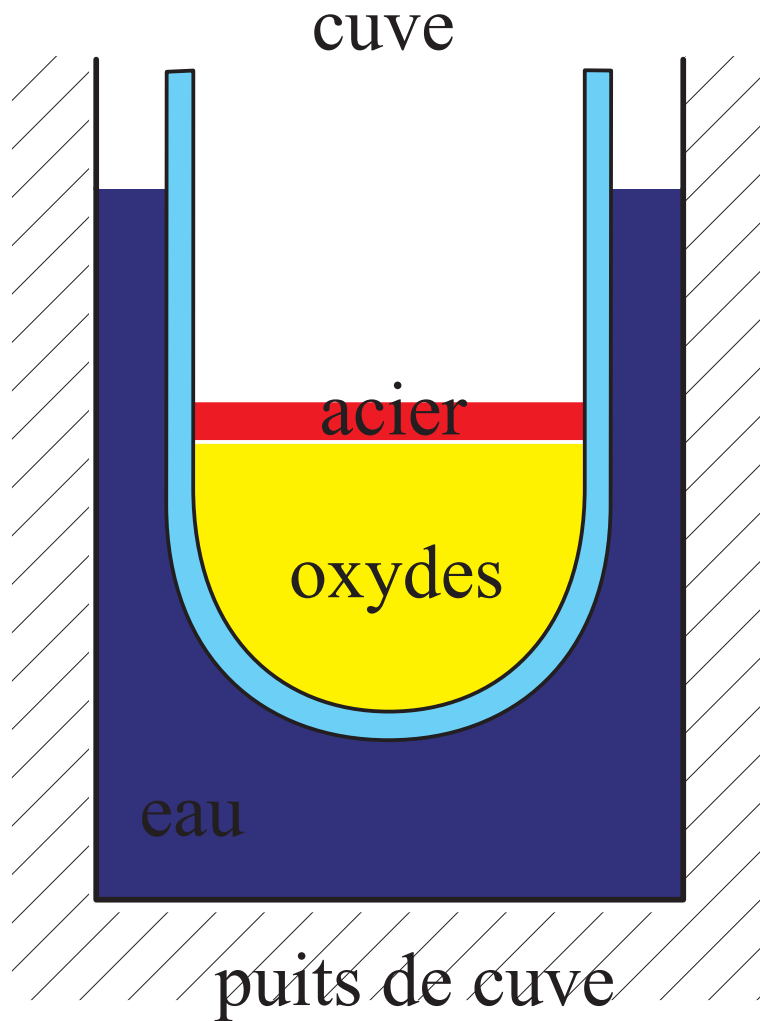
- A 288°C, 72 bar, $\rho_V = 37,64 \text{ kg/m}^3$.
- Gaz parfait : $pV = RT$, $R = 8.316 \text{ J/mol/K}$, $M = 18 \text{ g/mol}$.

$$V = \frac{RT}{p} = 6,481 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3, \quad \rho = \frac{M}{V} = 27,77 \text{ kg/m}^3$$

.

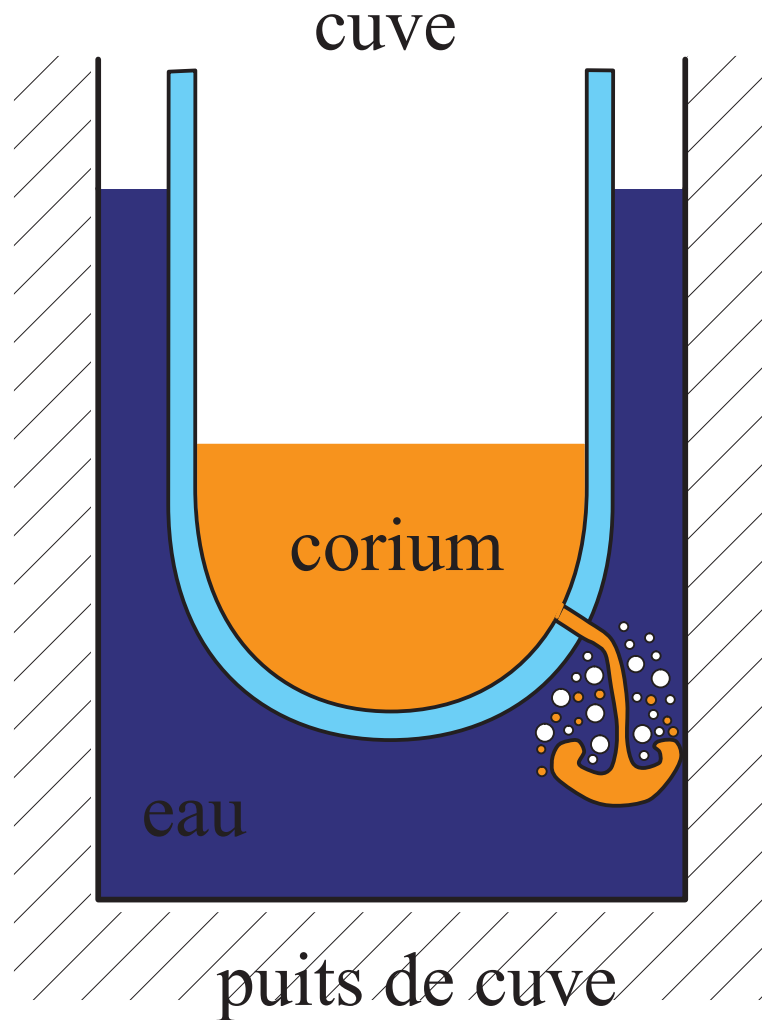
- Soit 26% d'écart.

ACCIDENTS GRAVES (1/4)



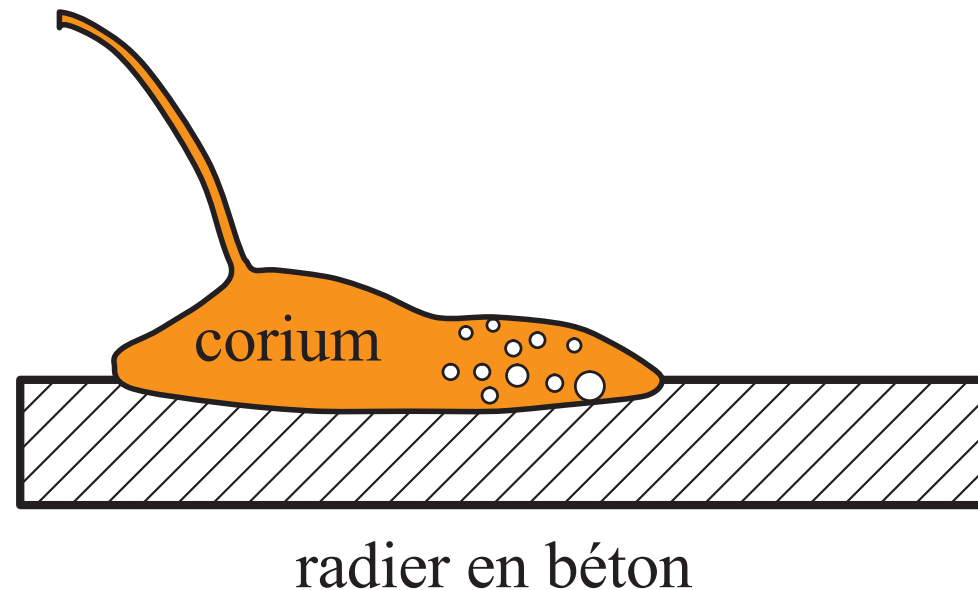
- Corium : oxydes et acier fondus
- Convection naturelle dans la cuve
- Puissance dégagée dans les oxydes
- Conduction dans l'acier
- Echanges oxydes et cuve
- Echanges eau cuve
- Enjeu : température de la cuve et percement

ACCIDENTS GRAVES (2/4)



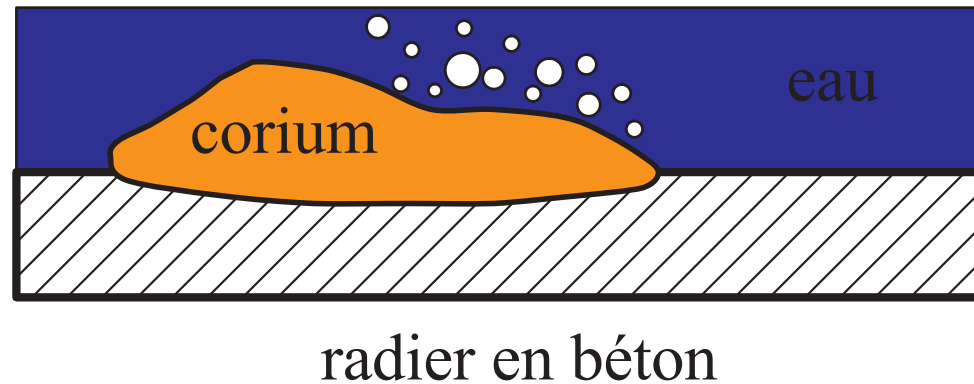
- Percement de la cuve
- Interaction corium eau
- Mélange corium eau
- Fragmentation : augmentation des échanges et ondes de pression
- Changement de phase : augmentation de volume
- Ondes de pression et fragmentation
- Enjeu : propagation et explosion thermique pour dimensionnement de l'enceinte (dernière barrière de confinement)

ACCIDENTS GRAVES (3/4)



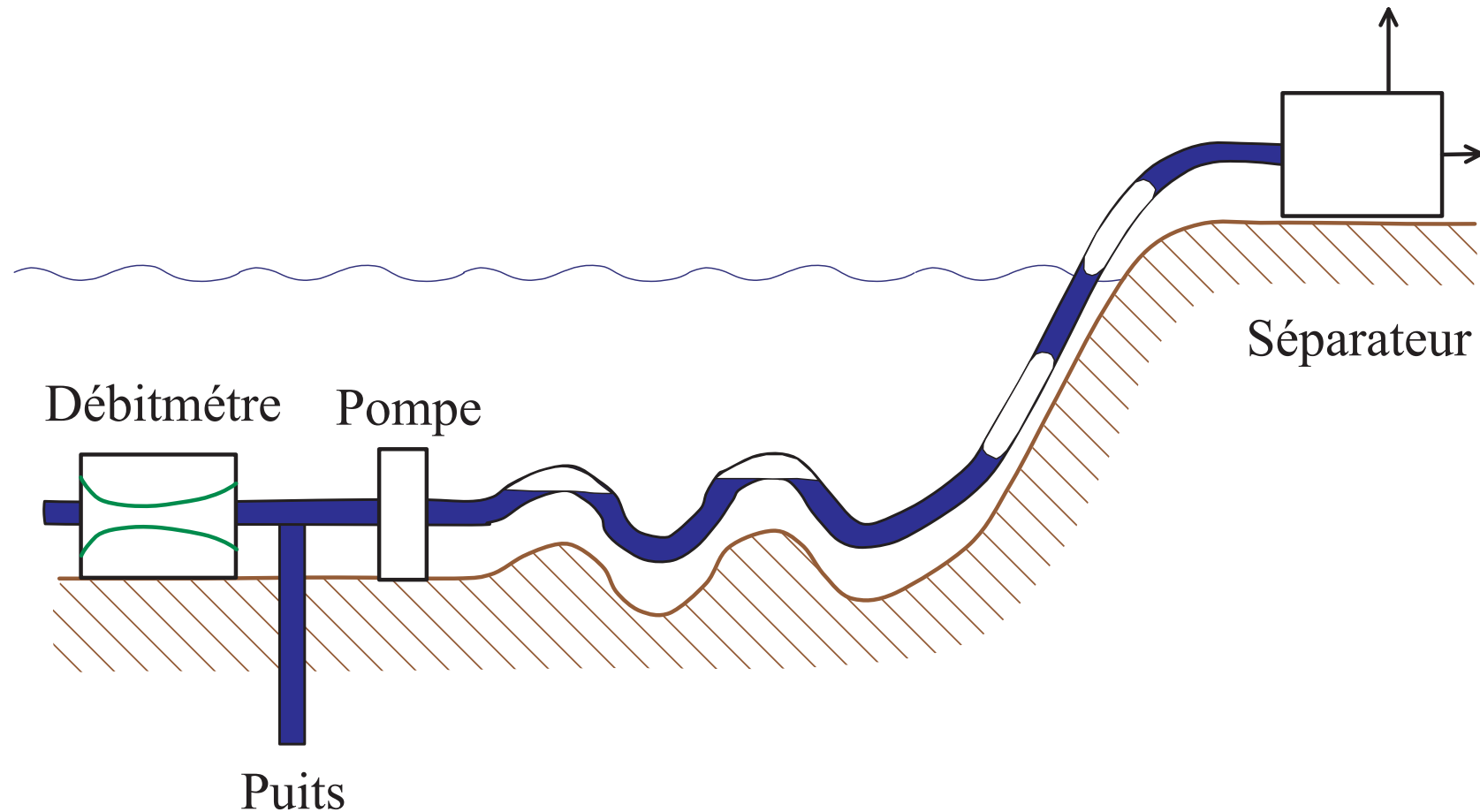
- Etallement du corium sur radier sacrificiel (EPR)
- Interaction corium béton : ablation
- Dégagement de gaz
- Formation de croues
- Echanges de chaleur radier corium
- Echanges de chaleur corium par rayonnement
- Enjeu : dimensionnement du radier et refroidissement du corium

ACCIDENTS GRAVES (4/4)



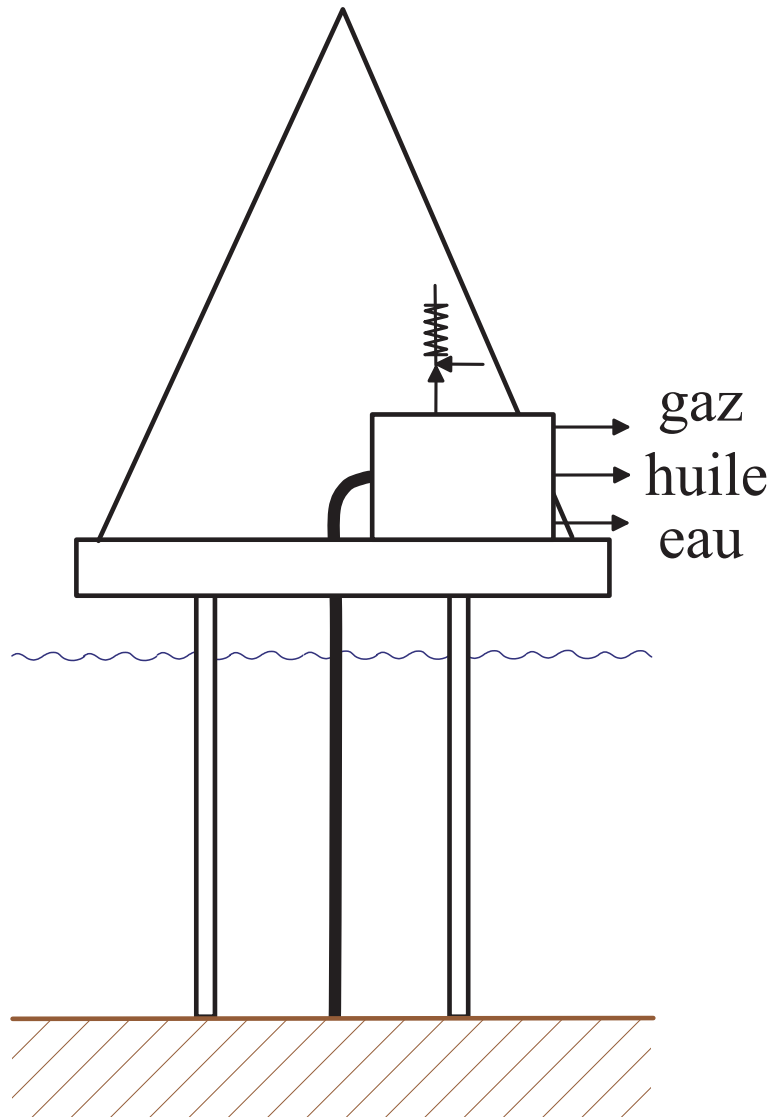
- Refroidissement du corium étalé à long terme
- Interaction corium eau : risque d'explosion de vapeur
- Echanges de chaleur corium eau et radier
- Dimensionnement du système de refroidissement

GENIE PETROLIER (Production diphasique)



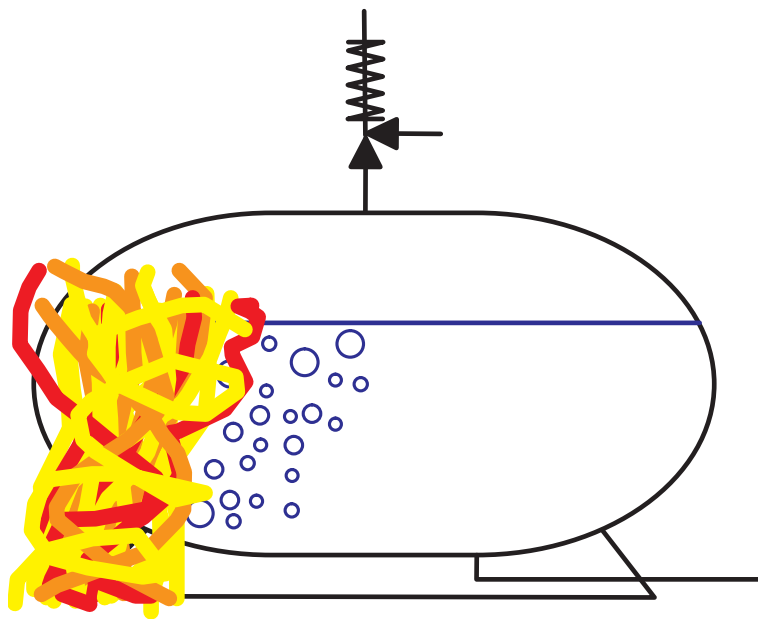
- Transport
 - Dimensionnement (ΔP)
 - Transitoires (bouchons)
 - Hydrates (thermodynamique)
- Pompage diphasique
- Comptage triphasique
- Séparation (dimensionnement)
- Gestion réservoir

GENIE PETROLIER (Sûreté des installations))



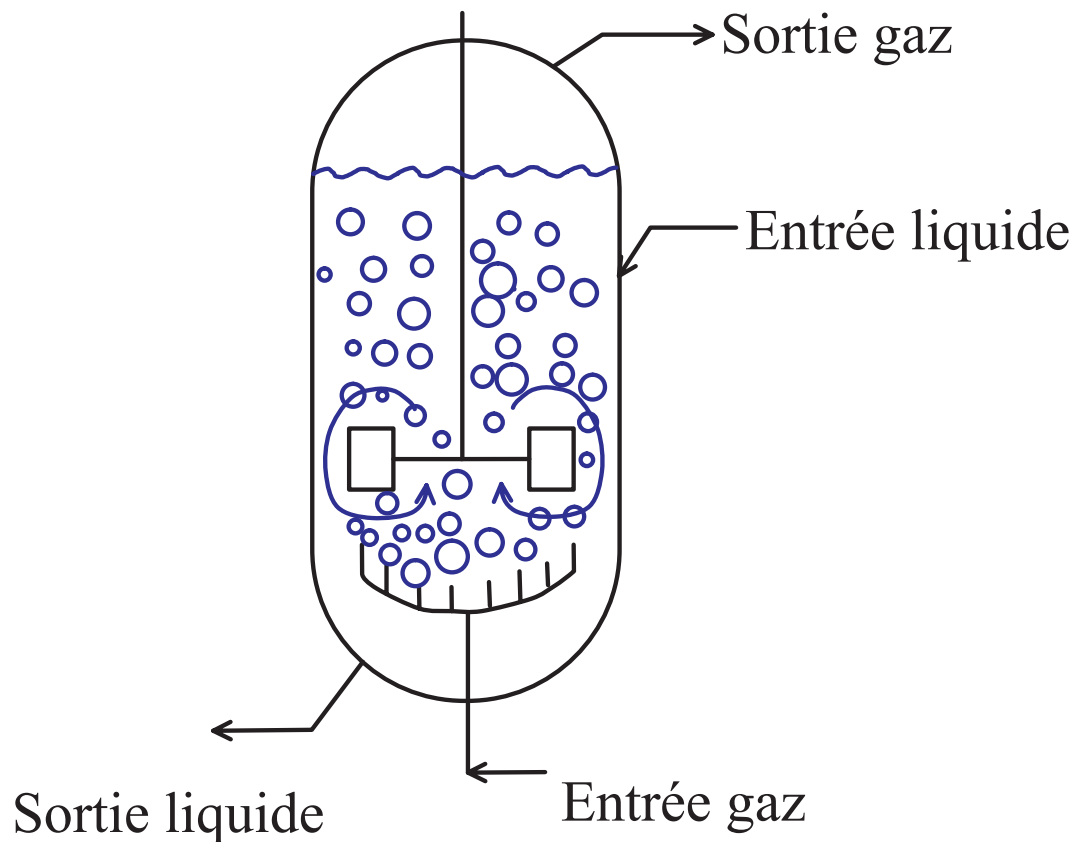
- Plate-forme de production
- Séparateur triphasique
- 3 sorties : eau, huile gaz
- Incendie : fermeture des sorties
- Dimensionnement des soupapes
- Blocage de débit
- Plusieurs sections critiques possibles

GENIE PETROLIER (Sûreté du stockage)



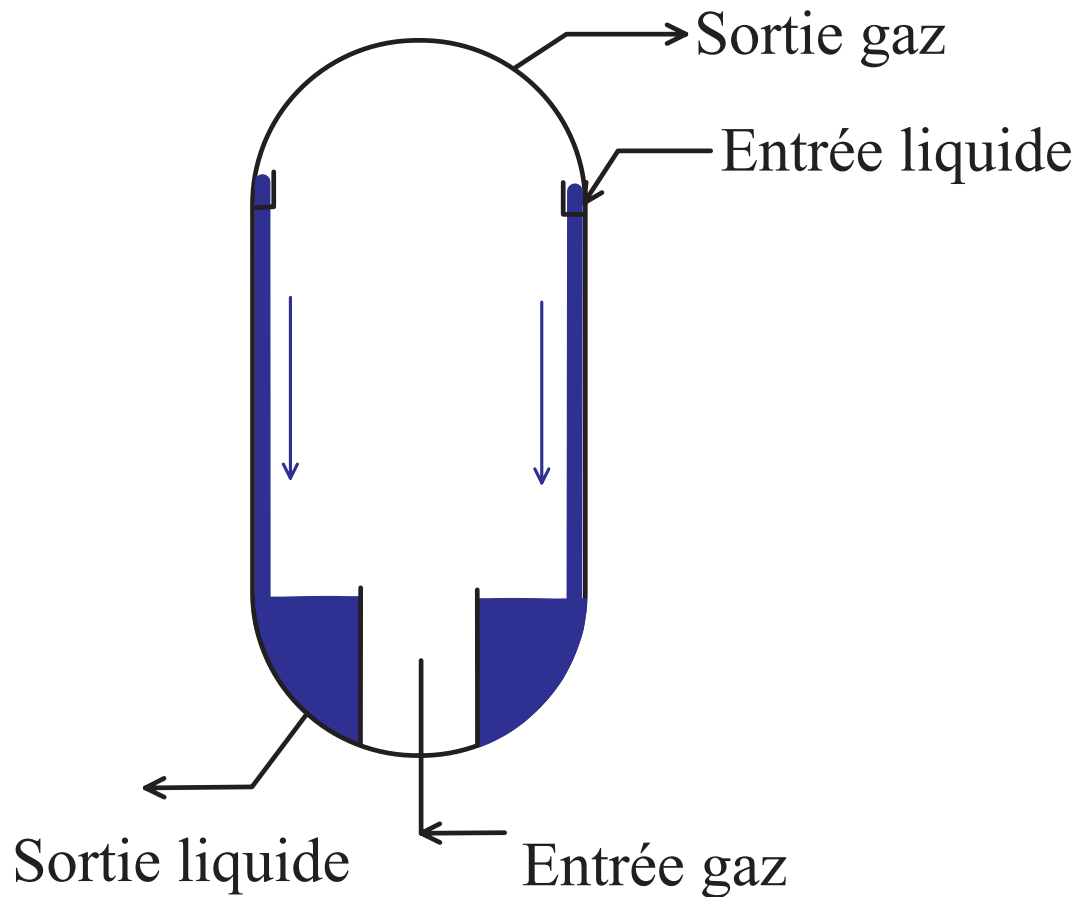
- Stockage GPL (C_3H_8)
- Incendie, risque BLEVE
- Dimensionnement des soupapes
- Brèche
- Blocage de débit à la brèche
- Autovaporisation et atomisation
- Dispersion atmosphérique
- Dépôt au sol
- Enjeu : espacement des sphères de stockage

GENIE CHIMIQUE (Dimensionnement 1/3)



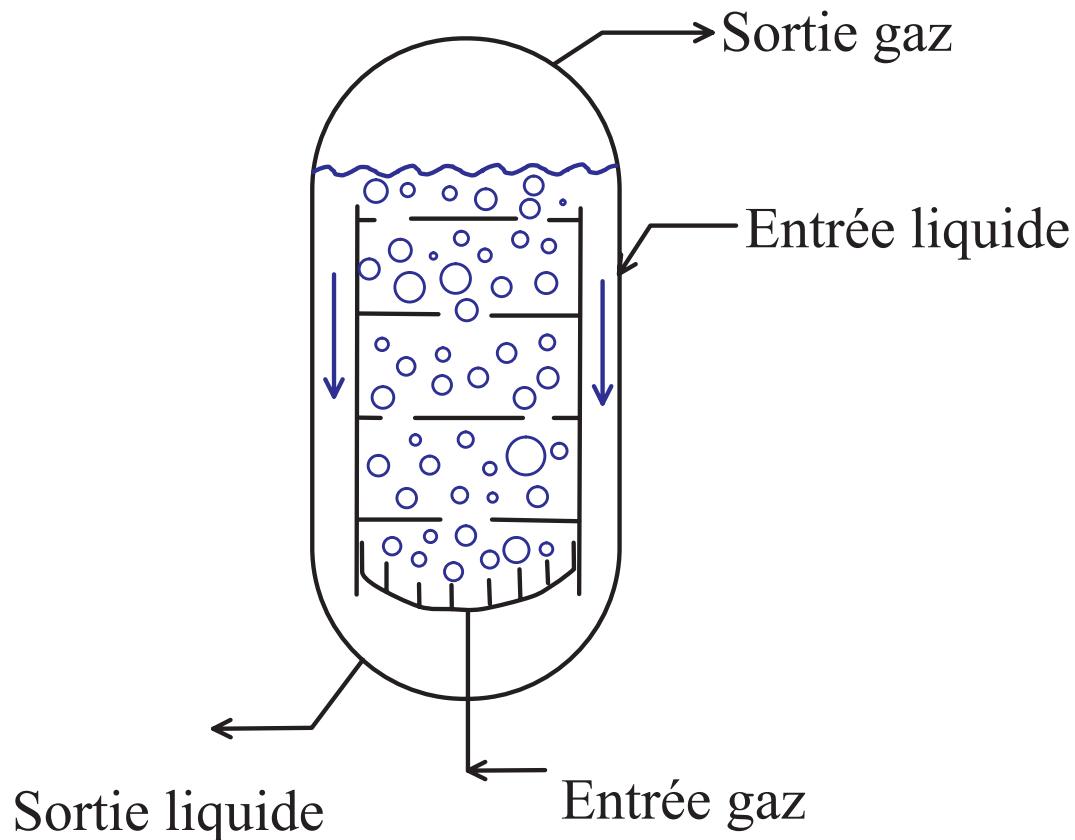
- Transfert de masse gaz-liquide
- Réacteur à bulles
- Mécaniquement agité
- Homogénéisation T et c
- Temps de séjour
- Aire interfaciale
- Enjeu : dimensionnement, consommation énergétique

GENIE CHIMIQUE (Dimensionnement 2/3)



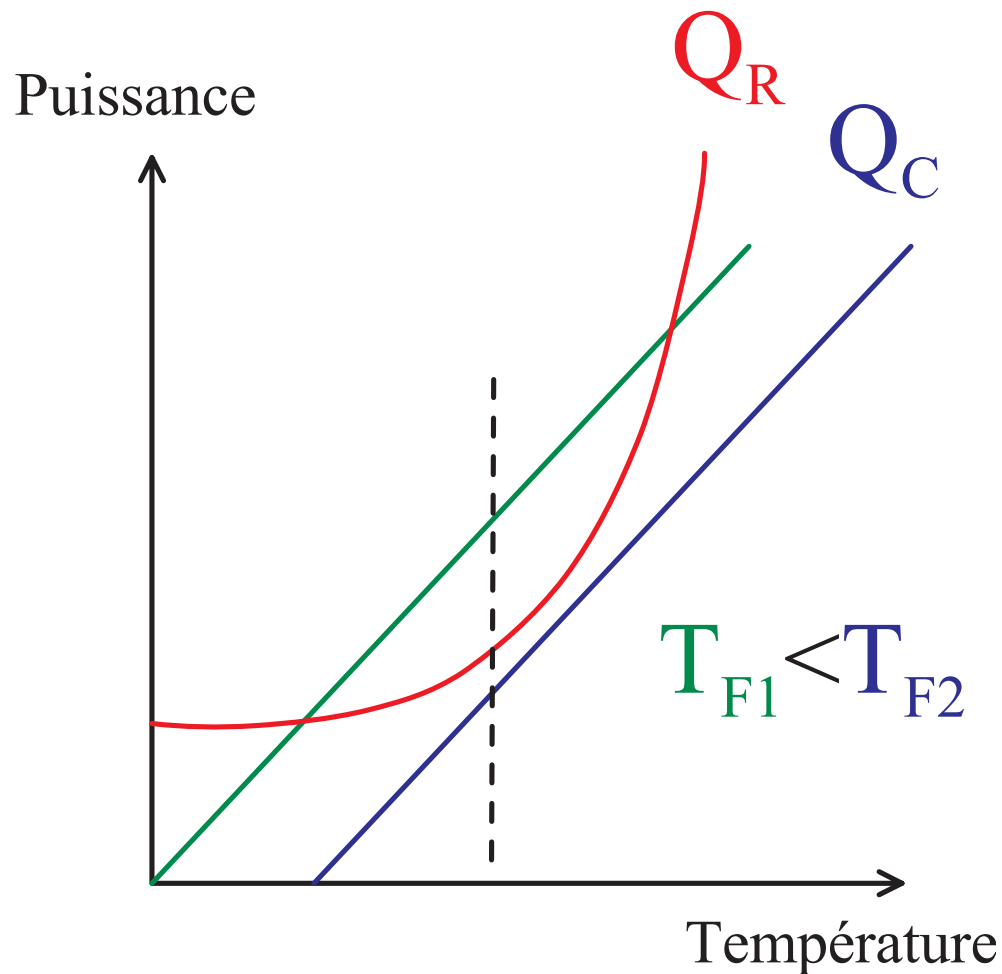
- Transfert de masse gaz-liquide
- Contacteur à film
- Contre courant
- Limite d'engorgement
- Enjeu : dimensionnement

GENIE CHIMIQUE (Dimensionnement 3/3)



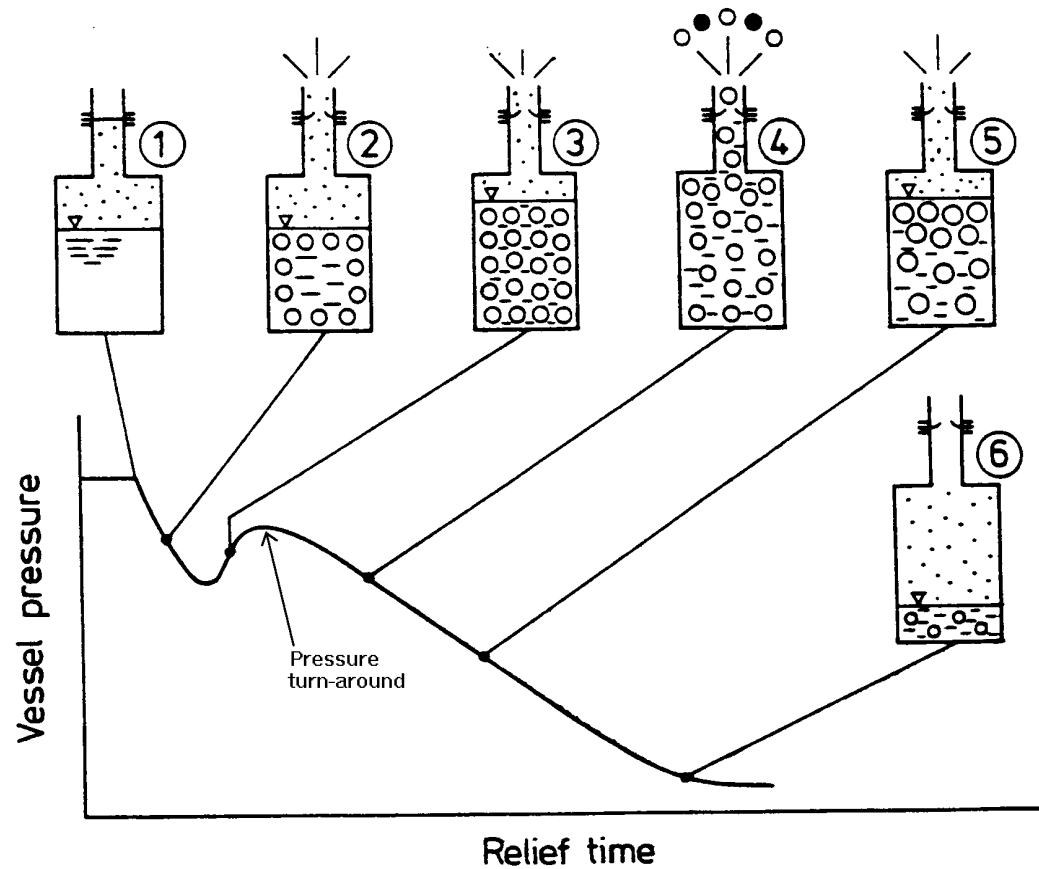
- Transfert de masse gaz-liquide
- Réacteur *gas lift*
- Circulation naturelle
- Turbulence induite par écoulement mo
- Couplage turbulence-chimie
- Temps de séjour
- Aire interfaciale
- Enjeu : optimisation obstacles

GENIE CHIMIQUE (Sûreté 1/2)



- Réaction exothermique (solvant liquide)
- $Q_R \propto \exp(T)$
- Refroidissement en convection forcée :
 $Q_C = h(T - T_F)$
- Perte de réfrigération $T_F \nearrow$
- Bilan thermique : $\frac{dU}{dt} = Q_R - Q_C$
- 1 point de fonctionnement stable
- Perte de refroidissement : $\frac{dU}{dt} > 0$
- Contrôle par trempe thermique :
 $\frac{dU}{dt} \approx -mh_V + Q$, $\frac{dM}{dt} = -m$,
 $M \frac{du}{dt} \approx -m(h_v - u) + Q$.

GENIE CHIMIQUE (Sûreté 2/2)

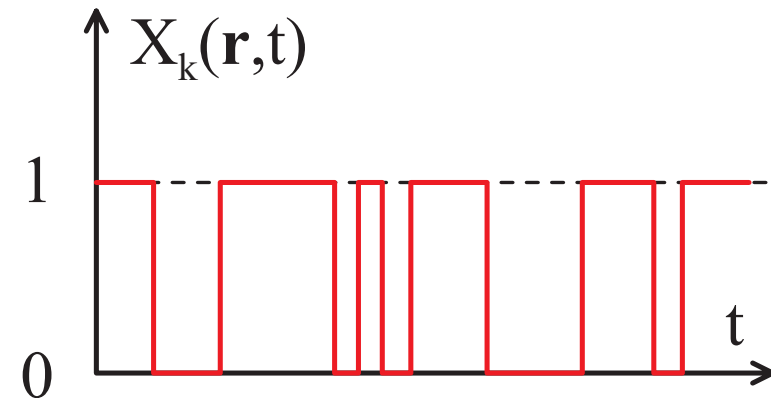
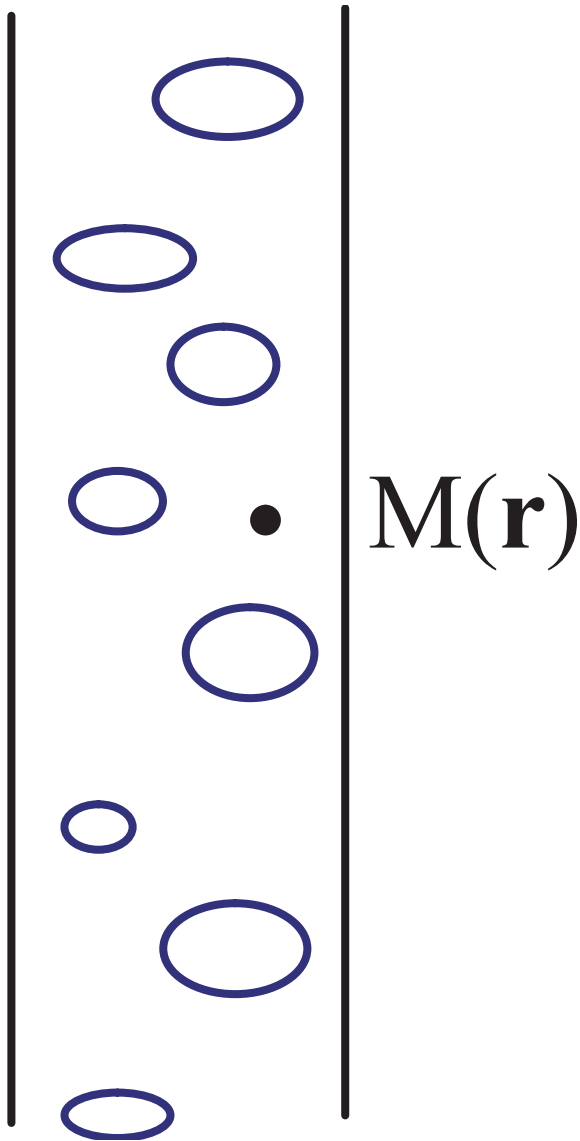


- Trempe thermique : extraire vapeur
- Dépressurisation : production vapeur
- Gonflement du niveau
- Entraînement de liquide
- Diminution du débit vapeur
- $M_{V2phase} = 1.0 \div 0.1 M_{V1phase}$

PARAMETRES DESCRIPTIFS DES ECOULEMENTS DIPHASIQUES

- Fonction indicatrice de phase
- Opérateurs de moyennes spatiales
- Débits instantanés
- Opérateurs de moyennes temporelles
- Commutativité des opérateurs de moyenne
- Débits et vitesses débitantes

FONCTION INDICATRICE DE PHASE



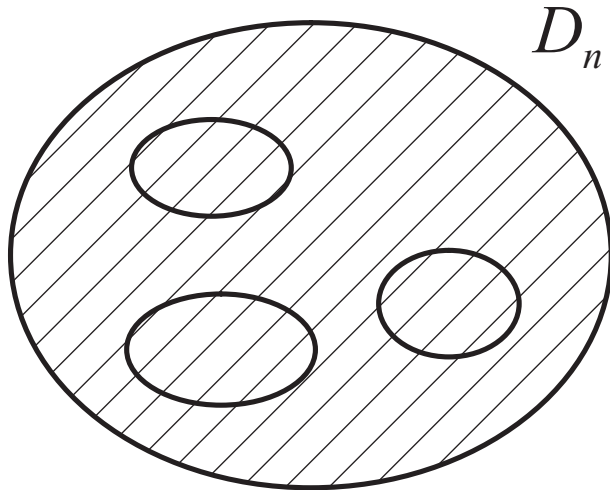
$$X_k(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in \text{phase } k \\ 0 & \text{si } x \notin \text{phase } k \end{cases}$$

Quantité mesurable

- Sonde résistive (impédance électrique)
- Sonde optique (indice optique)
- Sonde anémométrique (échange thermique)

Usage : $k = 1, 2, k = L, G, k = f, v$ etc.

MOYENNES SPATIALES (1/3)

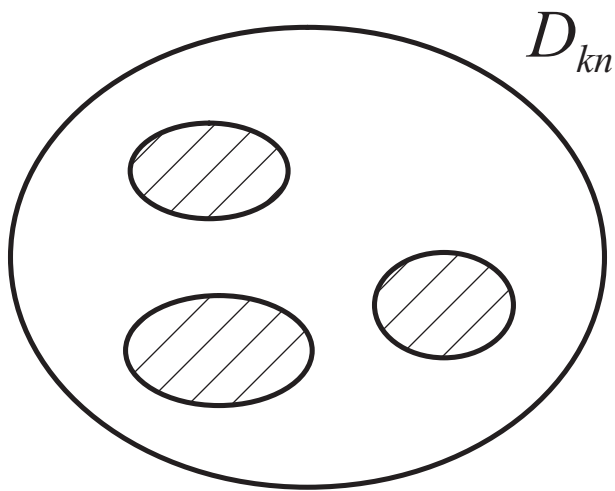


Moyenne spatiale (ordinaire)

$$\langle f \rangle_n \triangleq \frac{1}{D_n} \int_{D_n} f \, dD_n$$

- $n=1$, ligne (corde)
- $n=2$, surface (section)
- $n=3$, volume (tronçon de conduite)

MOYENNES SPATIALES (2/3)



Moyenne spatiale phasique

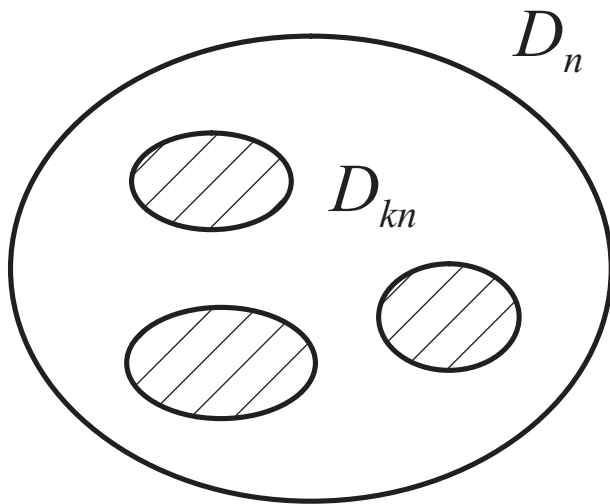
$$\langle f_k \rangle_n \triangleq \frac{1}{D_{kn}} \int_{D_{kn}} f_k \, dD_{kn}$$

- $n=1$, ligne (corde)
- $n=2$, surface (section)
- $n=3$, volume (tronçon de conduite)

MOYENNES SPATIALES (3/3)

Fraction spatiale instantanée

$$R_{kn}(t) \triangleq \langle X_k(\mathbf{r}, t) \rangle_n = \frac{D_{kn}}{D_n}$$

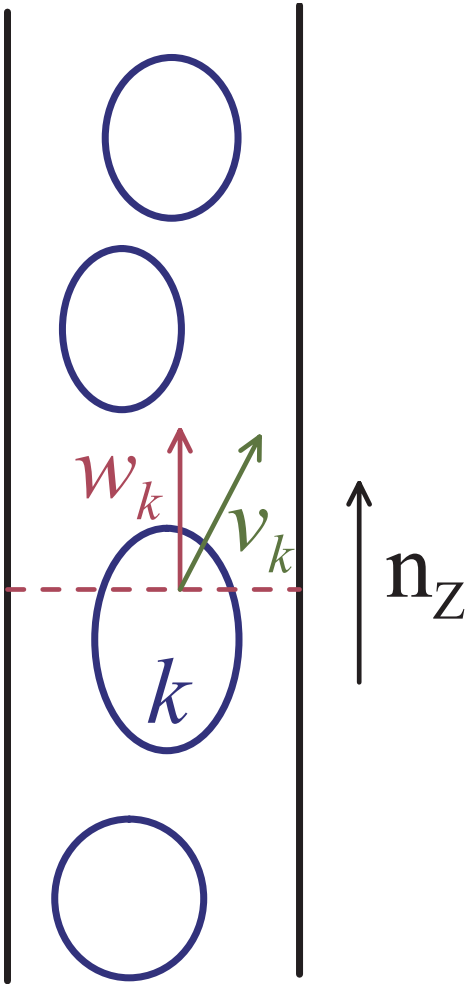


- $n=1$, fraction linéique $\frac{L_k}{L_1 + L_2}$
- $n=2$, fraction surfacique $\frac{A_k}{A_1 + A_2}$
- $n=3$, fraction volumique $\frac{V_k}{V_1 + V_2}$

Identité remarquable

$$R_{kn} \langle f \rangle_{kn} = \langle X_k f \rangle_n$$

DEBITS VOLUME ET MASSE



- Débit instantané, $w_k = \mathbf{v}_k \cdot \mathbf{n}_z$

$$Q_k(t) \triangleq \int_{A_k} w_k \, dA_k = A_k \langle w_k \rangle_2$$

- Débit masse instantané

$$M_k(t) \triangleq \int_{A_k} \rho_k w_k \, dA_k = A_k \langle \rho_k w_k \rangle_2$$

MOYENNES TEMPORELLES

Moyenne temporelle ordinaire sur $[T]$

$$\bar{f}(t) \triangleq \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) d\tau$$

Moyenne temporelle phasique sur $[T_k]$

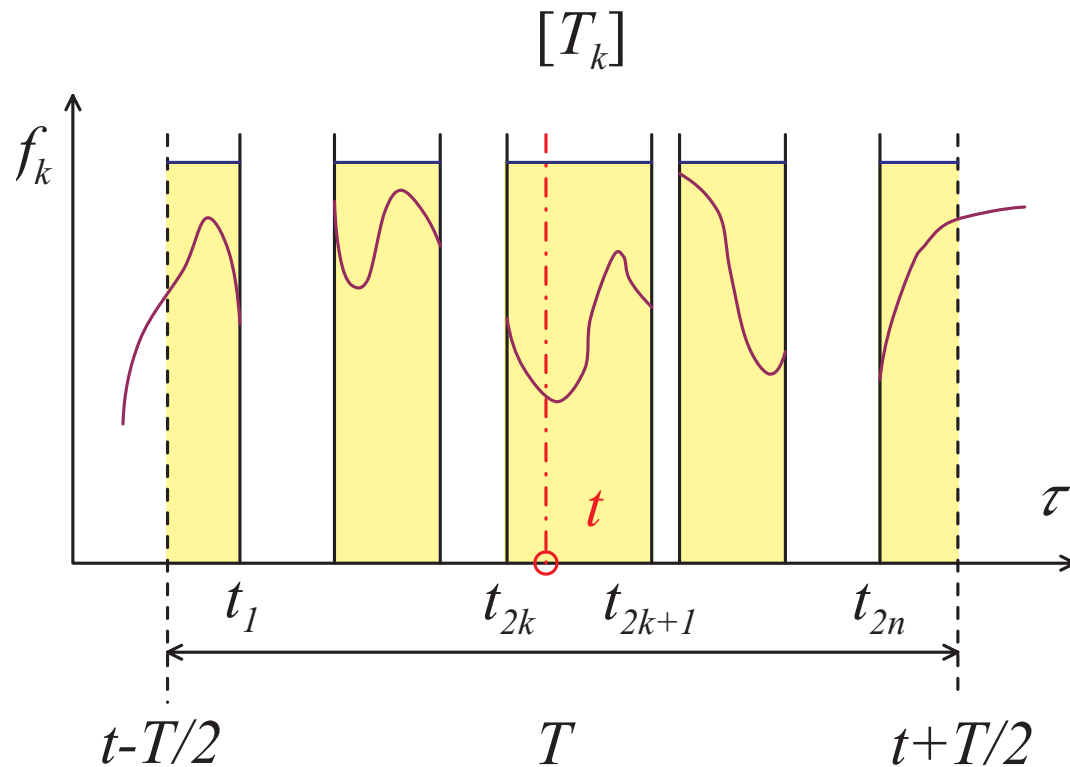
$$\bar{f}^X(t) \triangleq \frac{1}{T_k} \int_{[T_k]} f_k(\tau) d\tau$$

Taux de présence moyen, taux de vide

$$\alpha_k(\mathbf{r}, t) \triangleq \frac{T_k}{T} = \overline{X_k(\mathbf{r}, t)}$$

Identité remarquable

$$\alpha_k \bar{f}_k^X = \overline{X f_k}$$



COMMUTATIVITE DES OPERATEURS DE MOYENNE

$$\overline{R_{kn} < f_k >_n} = \left\langle \alpha_k \overline{f_k}^X \right\rangle_n$$

Démonstration :

$$\overline{R_{kn} < f_k >_n} = \frac{1}{T} \int_{[T]} \left\{ \frac{R_{kn}}{D_{kn}} \int_{D_{kn}(t)} f_k dD_{kn} \right\} dt$$

$$\frac{1}{T} \int_{[T]} dt \frac{1}{D_n} \int_{D_n} X_k f_k dD_n = \frac{1}{D_n} \int_{D_n} dD_n \frac{1}{T} \int_{[T]} X_k f_k dt$$

$$\frac{1}{D_n} \int_{D_n} \left\{ \frac{\alpha_k(\mathbf{r})}{T_k} \int_{[T_k]} f_k dt \right\} dD_n = \left\langle \alpha_k \overline{f_k}^X \right\rangle_n$$

Exemple : taux de vide, $f_k = 1$

$$\overline{R_{kn}} = \left\langle \alpha_k \right\rangle_n$$

QUELQUES PROPRIÉTÉS

- Débit volume moyen

$$\overline{Q_k} = A \overline{R_{k2} \langle w_k \rangle_2} = A \langle \alpha_k \overline{w_k^X} \rangle_2$$

- Débit masse moyen

$$\overline{M_k} = A \overline{R_{k2} \langle \rho_k w_k \rangle_2} = A \langle \alpha_k \overline{\rho_k w_k^X} \rangle_2$$

VITESSE DÉBITANTE

- Flux volumique moyen

$$j_k \triangleq \overline{X_k w_k} \equiv \alpha_k \overline{w_k^X}$$

- Flux massique moyen

$$g_k \triangleq \overline{X_k \rho_k w_k} \equiv \alpha_k \overline{\rho_k w_k^X}$$

- Vitesse débitante (*Superficial velocity*)

$$J_k = \langle j_k \rangle_2 = \langle \alpha_k \overline{w_k^X} \rangle_2 = \frac{\overline{Q_k}}{A}$$

- Vitesse débitante du mélange

$$J = J_1 + J_2 = \frac{\overline{Q_1} + \overline{Q_2}}{A}$$

TITRES

- Vitesse massique moyenne

$$G_k \stackrel{\Delta}{=} \overline{X_k \rho_k w_k} \equiv \alpha_k \overline{\rho_k w_k^X}$$

- Vitesse massique du mélange

$$G = G_1 + G_2 = \frac{\overline{M_1} + \overline{M_2}}{A}$$

- Titre massique

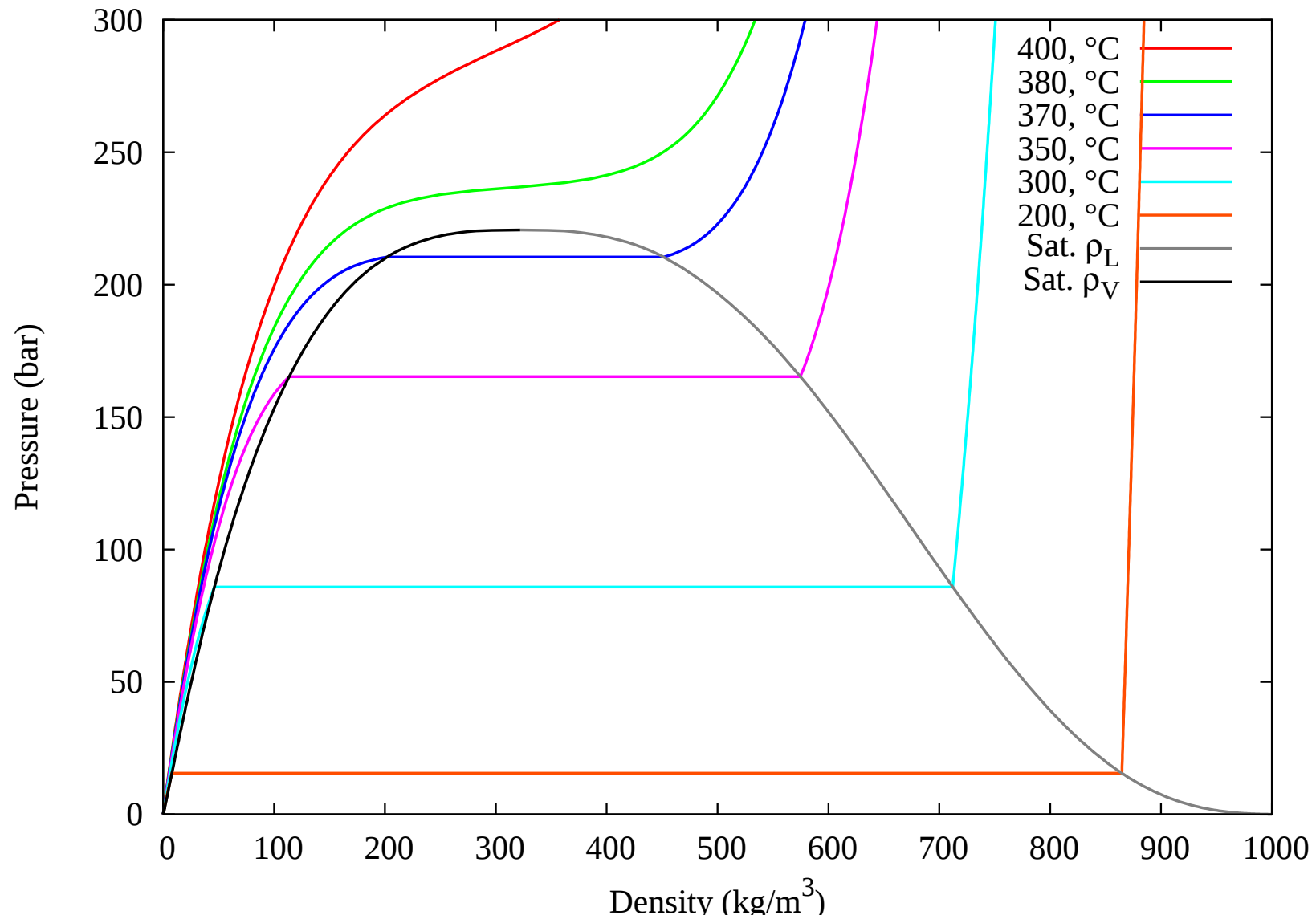
$$x_k = \frac{M_k}{M}, \quad M = M_1 + M_2$$

- Titre volumique

$$\beta_k = \frac{Q_k}{Q}, \quad Q = Q_1 + Q_2$$

- Titre thermodynamique à l'équilibre...

EAU DANS LE PLAN (ρ, p)



Pression et température critiques : ≈ 221 bar, $373,9^\circ\text{C}$.

TITRE THERMODYNAMIQUE

- Hypothèse d'équilibre thermodynamique

$$T_L = T_V = T_{\text{sat}}(p), \quad h_k(T_k, p) = h_k(T_{\text{sat}}(p), p) \triangleq h_{k\text{sat}}(p)$$

- Hypothèse des *profils plats* (1D)
- Bilan d'énergie, pression uniforme, q , flux uniforme

$$P = \pi q D z = M[h(z) - h_1] = M[(x_{eq} h_{V\text{sat}} + (1 - x_{eq}) h_{L\text{sat}}) - h_{L1}]$$

$$x_{eq} = \frac{\pi q D z}{M h_{lv}} - \frac{h_{L\text{sat}} - h_{L1}}{h_{lv}}$$

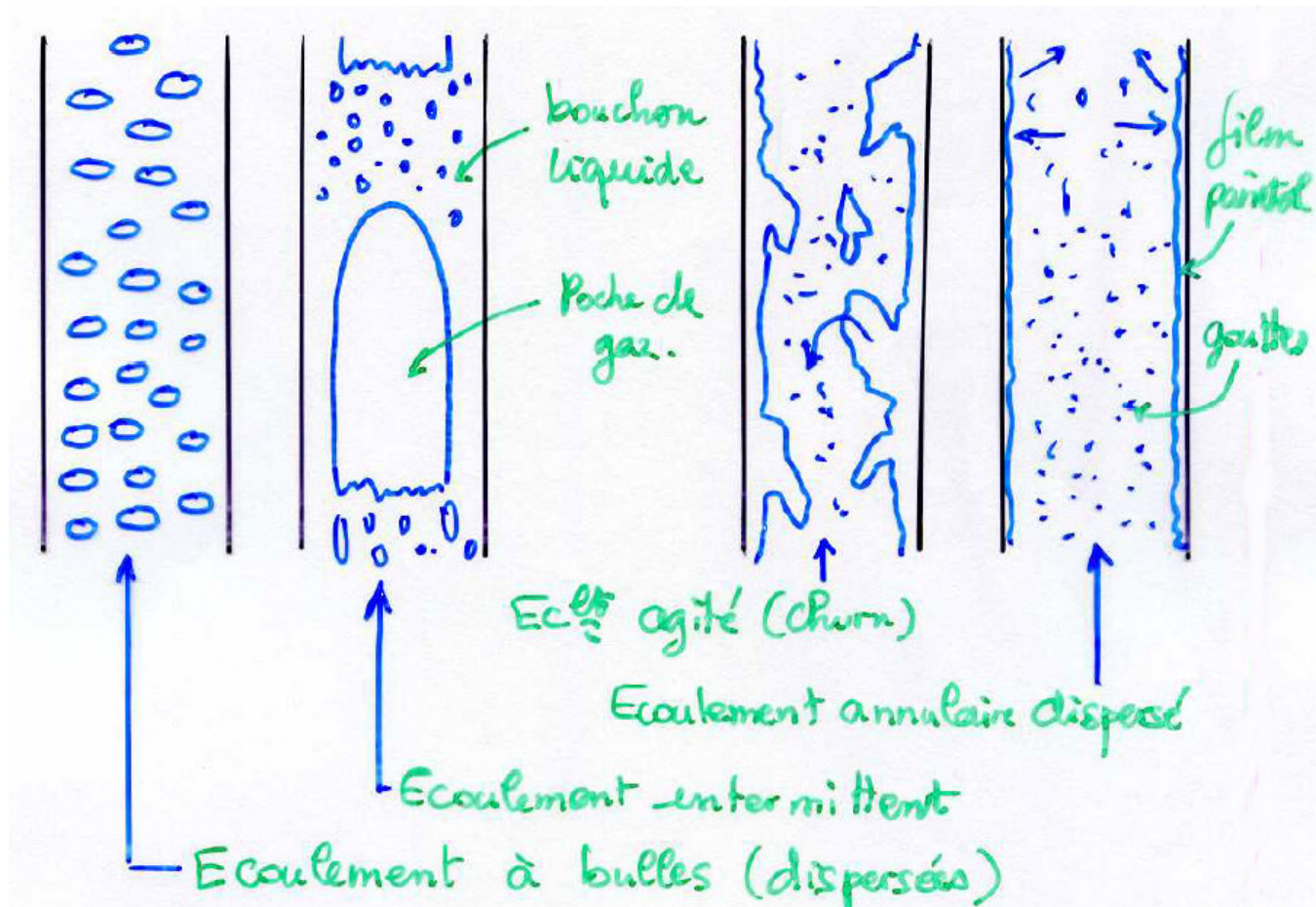
- Enthalpie de changement de phase : $h_{lv} \triangleq h_{V\text{sat}} - h_{L\text{sat}}$
- Le titre thermodynamique et la position sont liés par une relation linéaire.
- si h est l'enthalpie moyenne dans une section, le titre thermodynamique représente une enthalpie sans dimension :

$$x_{eq} = \frac{h - h_{L\text{sat}}}{h_{lv}}$$

LES RÉGIMES D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES

- Organisation topologique de l'écoulement (spontanée ?...)
 - bulles
 - poches et bouchons
 - films liquides
 - pas de transitions franches
- Motivation de l'identification des régimes : la modélisation
 - monophasique : laminaire-turbulent (NS ou RANS)
 - diphasique : modèle adapté aux structures
 - difficultés : transitions floues, définies pour les écoulements développés, rôle des singularités...
- Paramètres de contrôle : débits, inclinaison, direction, diamètre, propriétés physiques, conditions d'entrée, etc.
- Exemples : écoulements verticaux et horizontaux co-courant.

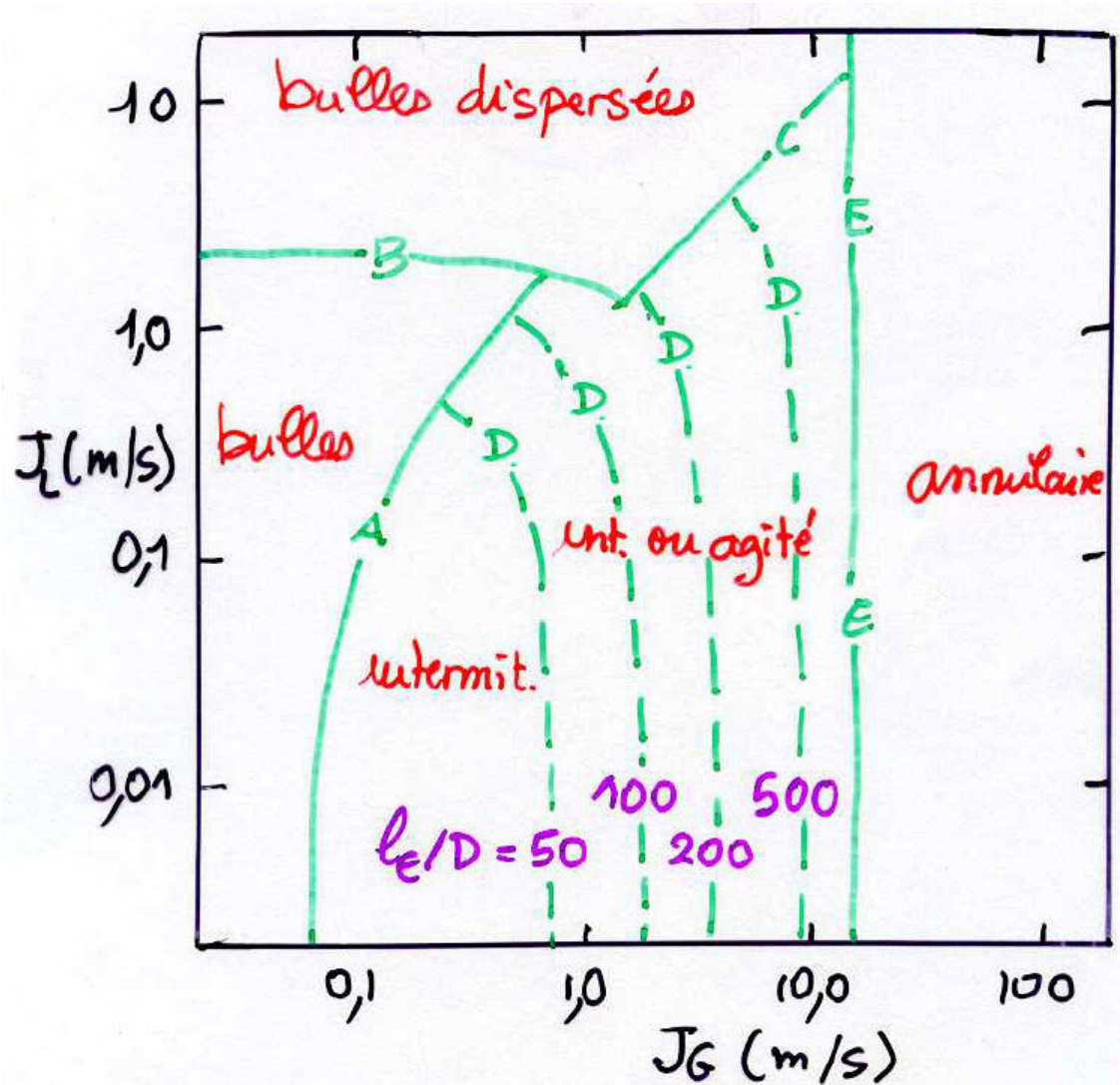
LES REGIMES D'ÉCOULEMENT VERTICAUX



Critères de transition :

- Empiriques, débits, flux de quantité de mouvement
- Modélisation des mécanismes de transition ([Dukler & Tailleur, 1986](#)).

LE MODÈLE DE TAITEL ET DUCKLER (1980)



Paramètres :

- eau-air
- $D = 50$ mm
- $P = 1$ bar

LE MODÈLE DE TAITEL ET DUCKLER (1980)

- Transition bulles-poches de gaz et bouchons de liquide (A) : coalescence, bulles à trajectoires en zig-zag.

$$J_L = \frac{1-\alpha}{\alpha} J_G - (1-\alpha)^{\frac{3}{2}} U_{0\infty}, \quad \alpha_T = 0,25, \quad U_{0\infty} = 1,53 \left(\frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right)^{\frac{1}{4}}$$

- Transition bulles-dispersé à bulles : fractionnement turbulent, petites bulles à trajectoire rectiligne (B), gêne stérique voir (A) avec $\alpha_T = 0,52$ (D).

$$\frac{2[\rho_L/(\rho_L - \rho_G)g]^{0,5} \nu_L^{0,08}}{(\sigma/\rho_L)^{0,10} D^{0,48}} J^{1,12} \geq 3,0$$

- Transition poches-écoulement agité (D) : écoulement agité $\equiv$ établissement de l'écoulement à poches.

$$\frac{L}{D} = 42,6 \left(\frac{J}{\sqrt{gD}} + 0,29 \right)$$

LE MODÈLE DE TAITEL ET DUCKLER (1980)

- Transition vers l'écoulement annulaire (E) : le gaz doit entraîner tout le liquide vers le haut, bilan de force,

$$\frac{J\rho_G^{\frac{1}{2}}}{[\sigma g(\rho_L - \rho_G)]^{\frac{1}{2}}} = 3,1$$

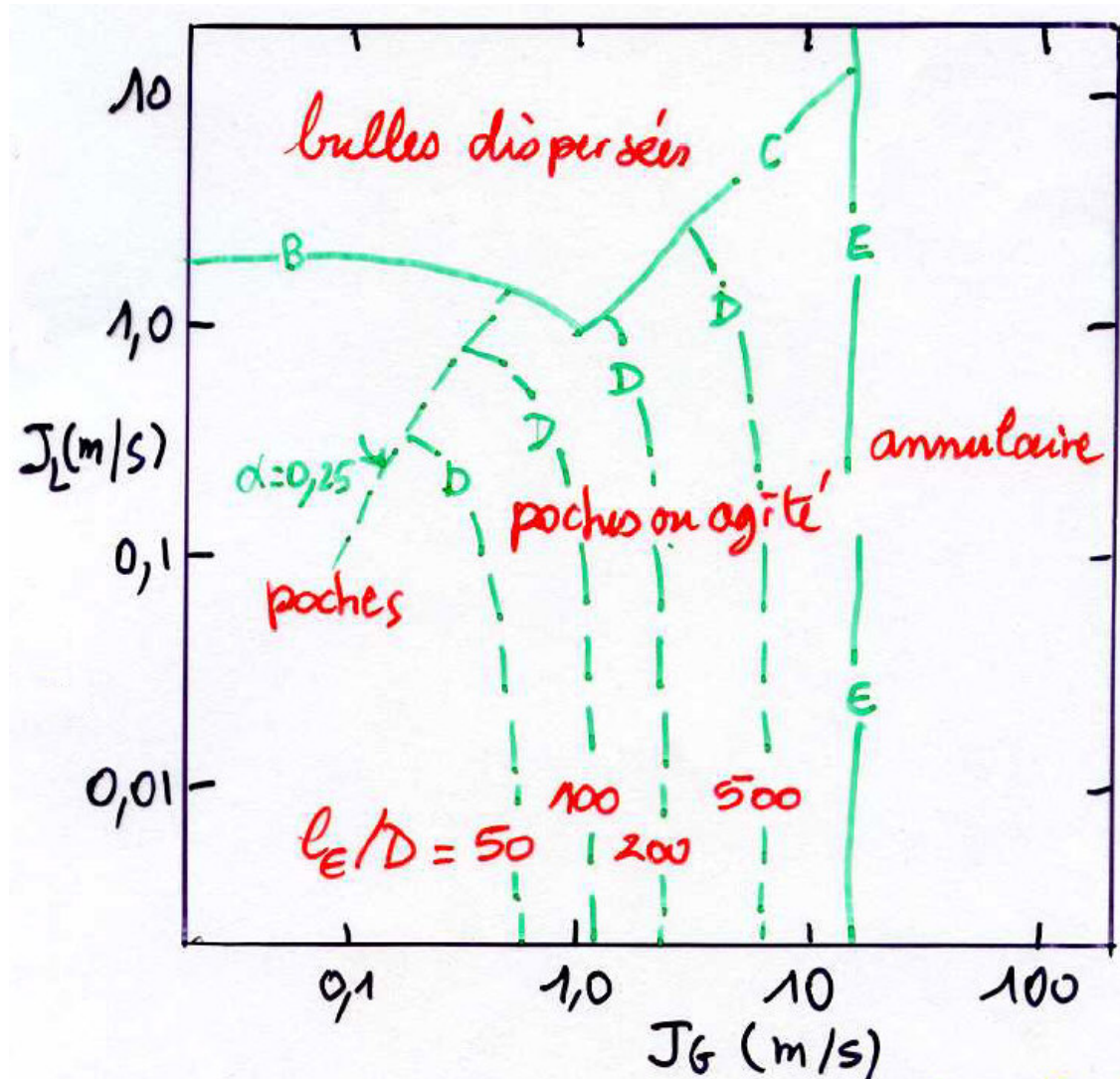
Voir aussi les corrélations de flooding et Ku.

- Cas des conduites de petit diamètre : bulles (zig-zag) et bulles de Taylor occasionnelles.
 - Vitesse relative des bulles de Taylor : $U_T = 0,35\sqrt{gD}$
 - Vitesse relative des bulles : $U_B = U_{0\text{inf}}(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}, \quad \alpha = 0,25$
 - Pour les petites conduites les bulles de Taylor sont plus lentes que les bulles, l'agglomération forme des poches.

$$\left(\frac{\rho_L^2 dD^2}{(\rho_L - \rho_G)\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \leq 3,78$$

- Le régime à bulles disparaît.

LE MODÈLE DE TAITEL ET DUCKLER (1980)

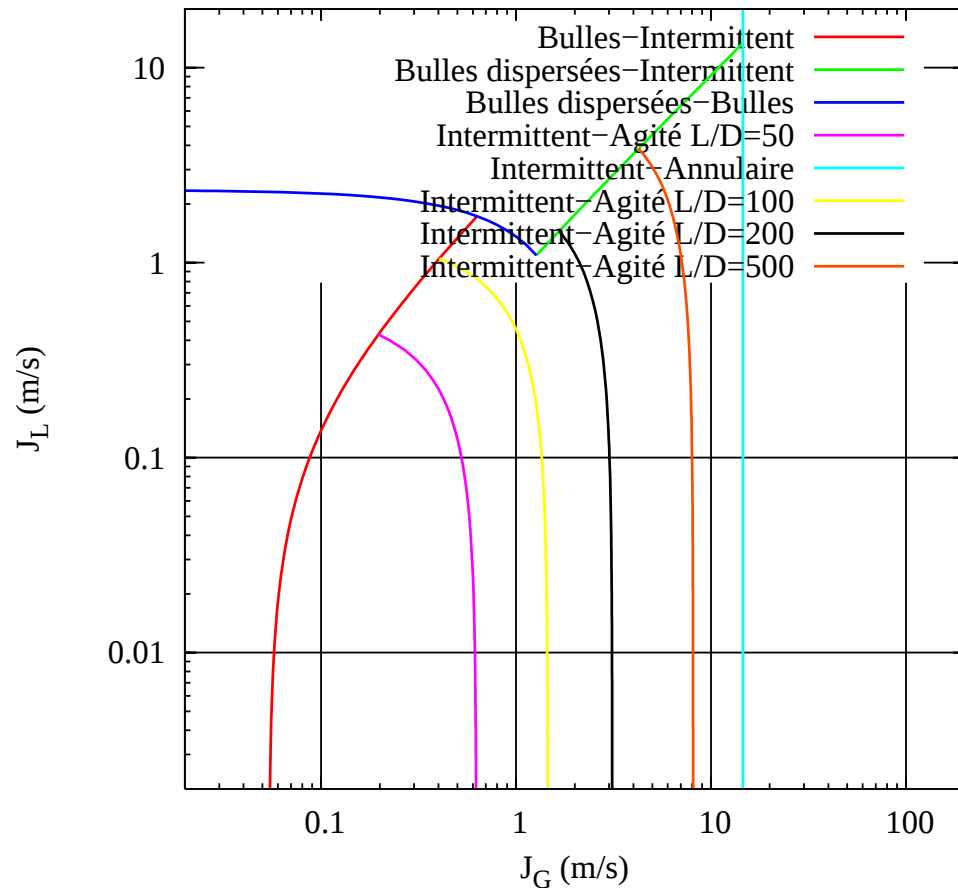


Disparition du régime à bulles

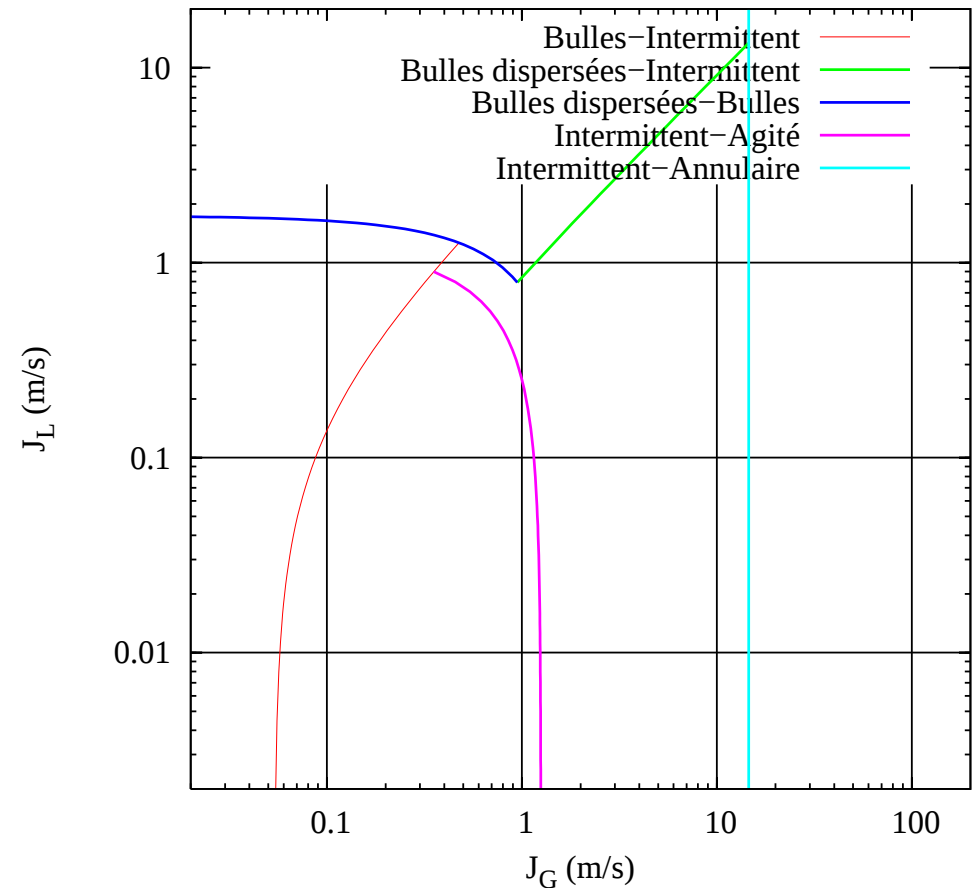
Paramètres :

- eau-air
- $D = 25$ mm
- $P = 1$ bar

APPLICATIONS : VertTD02

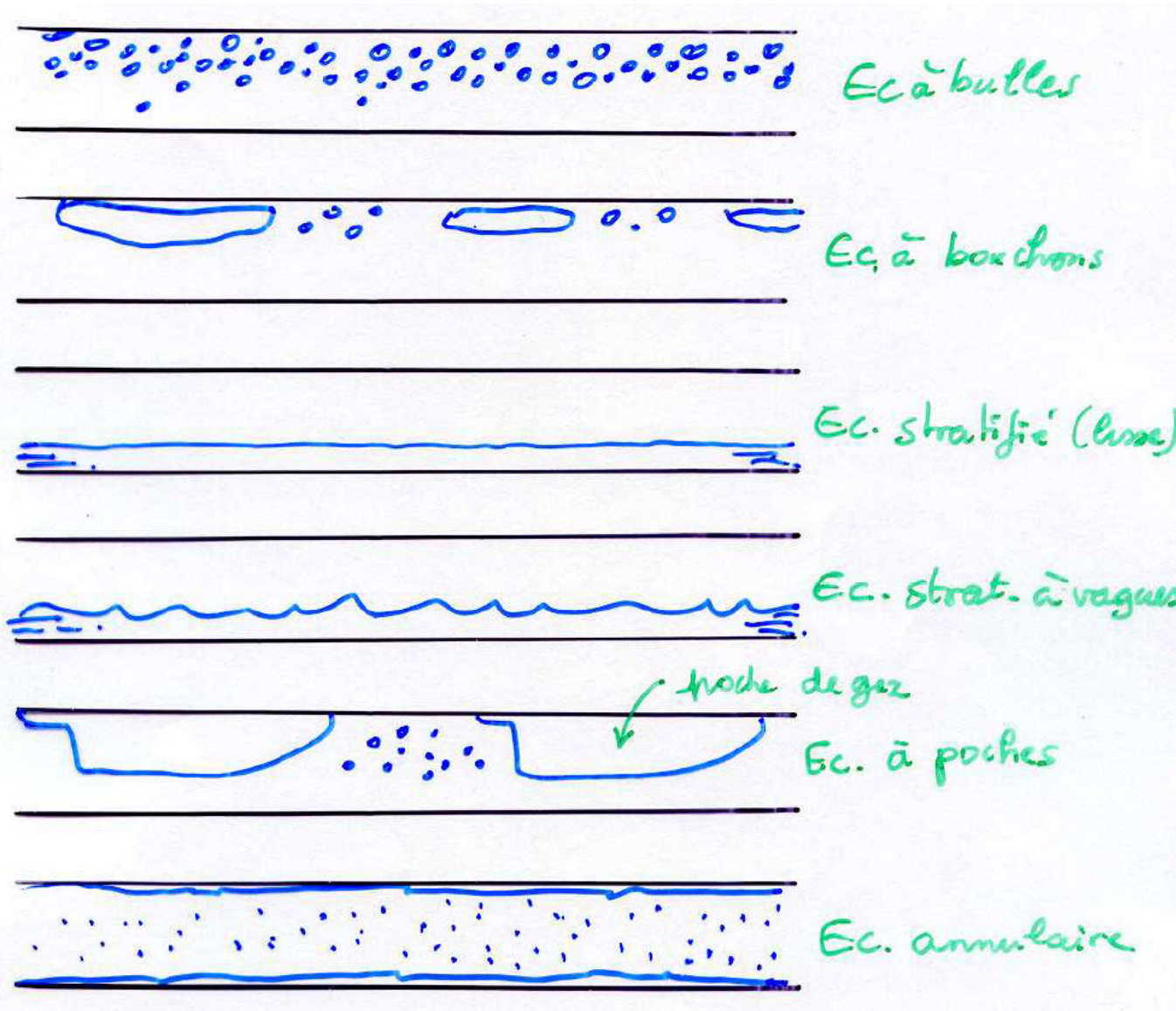


Eau-air, 51 mm, 1 bar



Eau-air, 25 mm, $L/D = 100$, 1 bar

LES REGIMES D'ÉCOULEMENT HORIZONTAUX



Principales configurations :

- Bulles
- Bouchons
- Stratifié, lisse ou à vagues
- Poches de gaz et bouchons de liquide
- Annulaire

Modélisation des mécanismes de transition ([Dukler & Tailer, 1986](#)).

LES REGIMES D'ÉCOULEMENT HORIZONTAUX

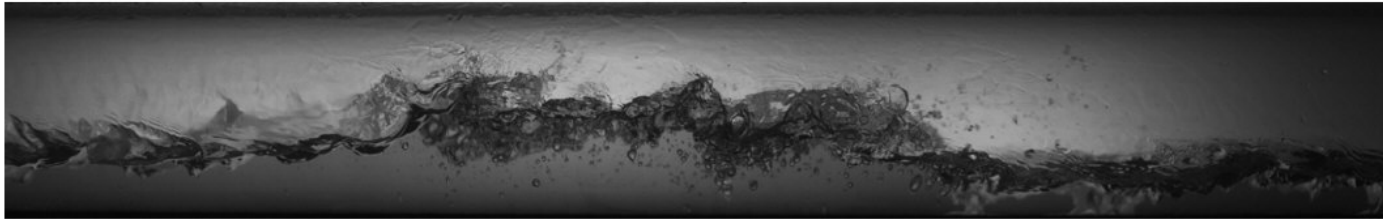


Photo 17, Wavy-stratified flow, with roll waves, Test 33

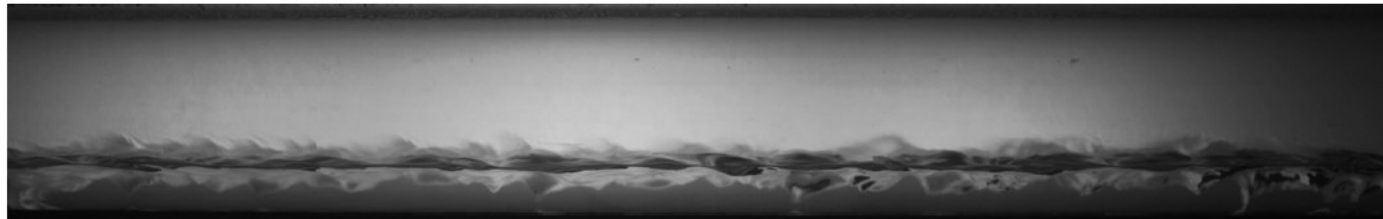


Photo 15 , Wavy-stratified flow, Test 32.

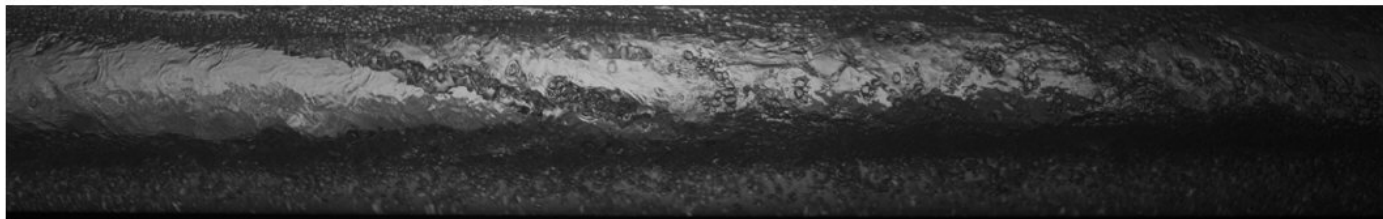


Photo 25, Slug flow.

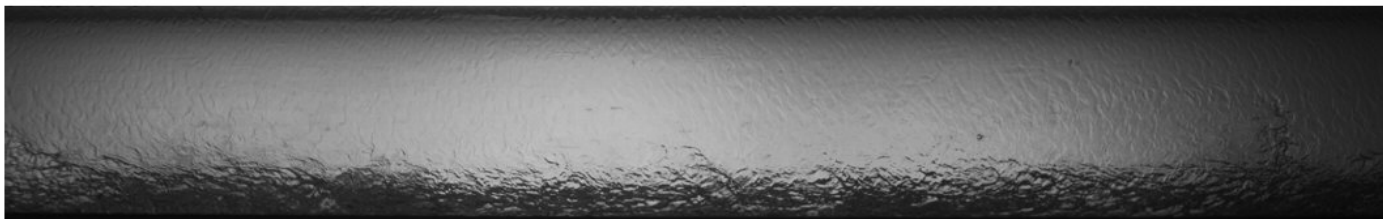


Photo 22, Annular flow.

L'ÉCOULEMENT A POCHES

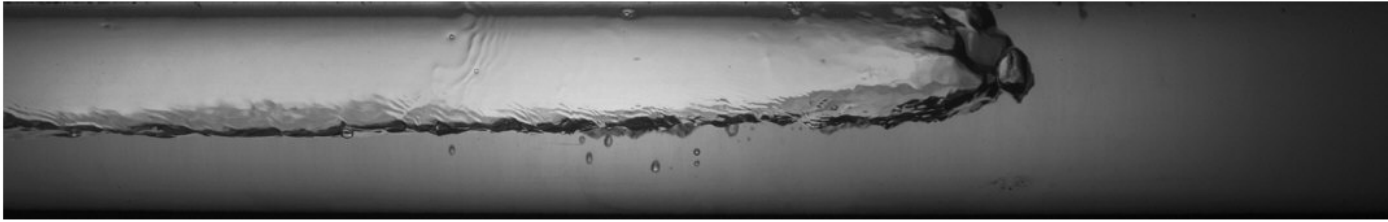


Photo 02.

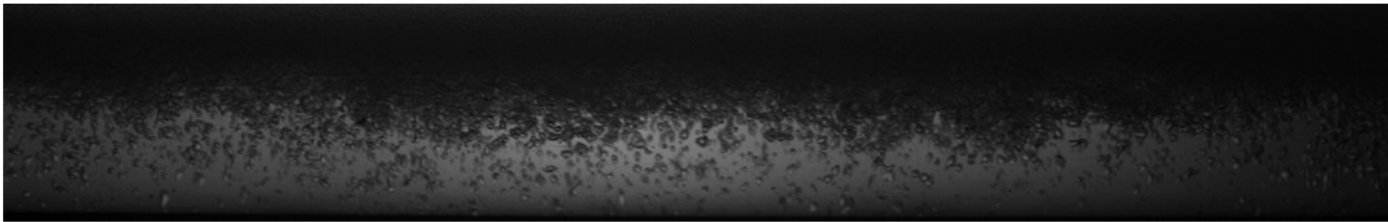


Photo 07.

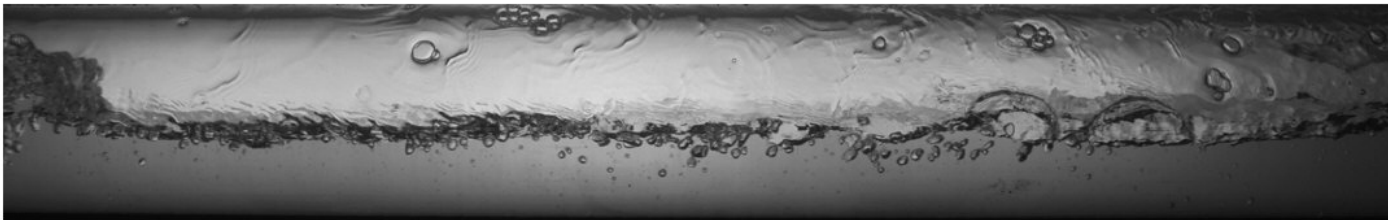


Photo 09.

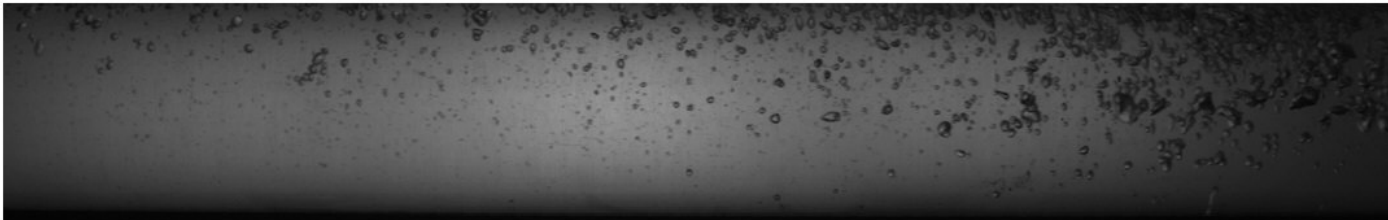
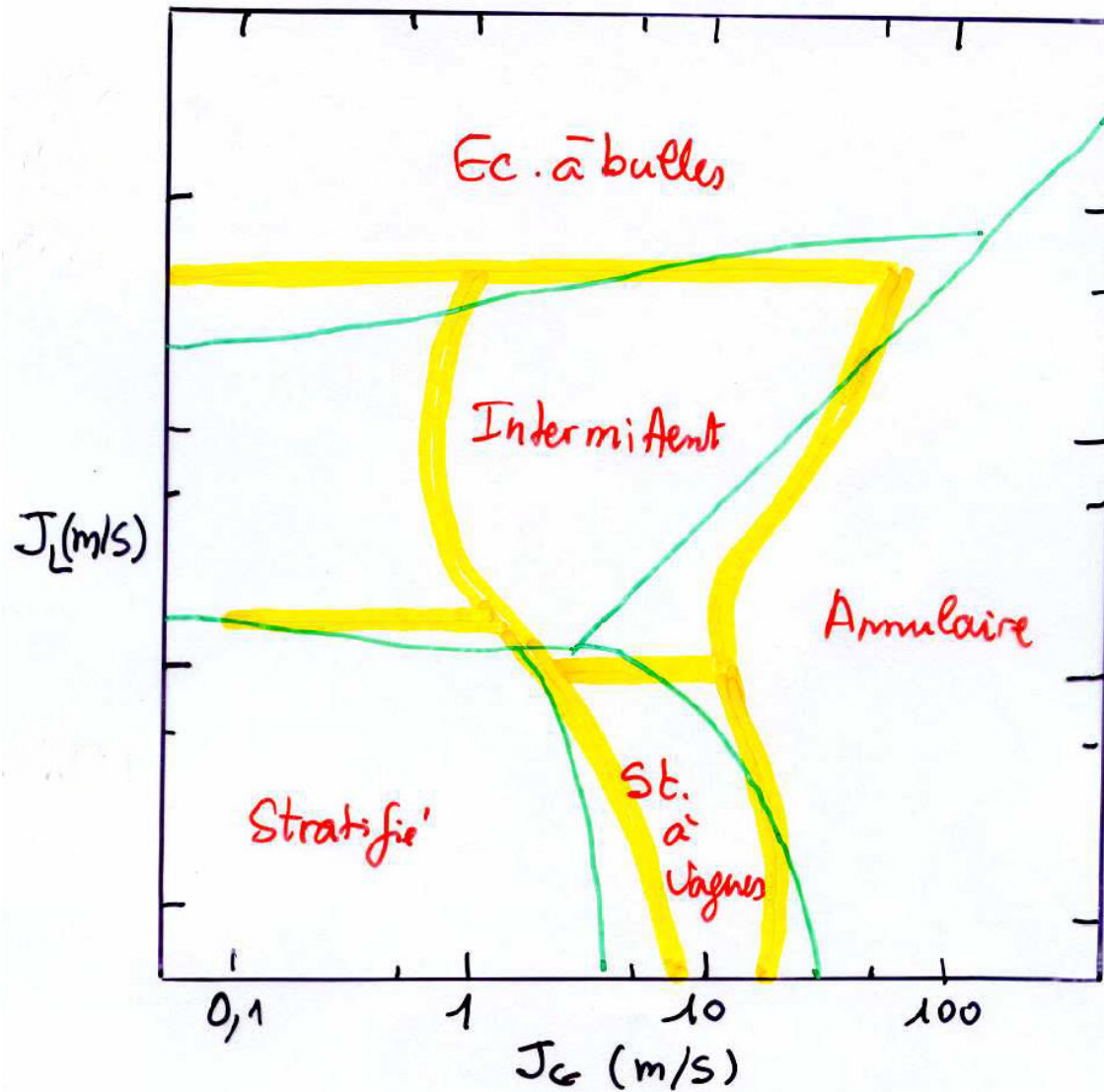


Photo 12.

$$\alpha = 22\%$$

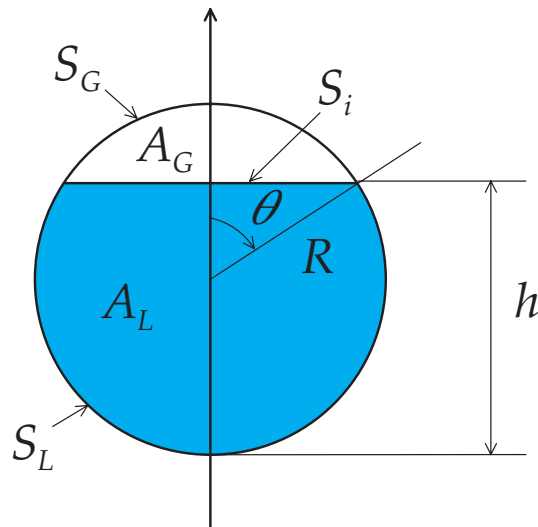
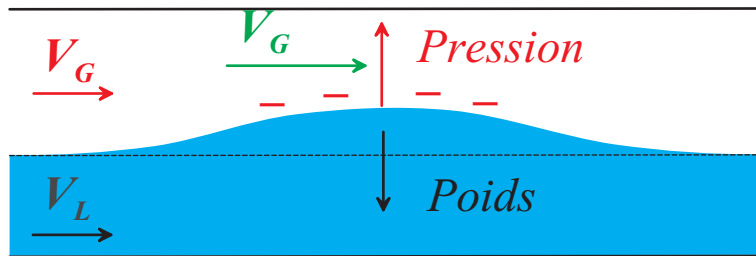
LE MODELE DE TAITEL ET DUKLER (1976)



Critères de transition :

- Empiriques, ex. :
Mandhane, eau-air, 1bar,
25 mm.
- Modélisation des
mécanismes de transition
([Dukler & Taitel, 1986](#)).

LE MODELE DE TAITEL ET DUKLER (1976)



- Perturbations de l'écoulement stratifié lisse, analyse de stabilité (on y reviendra... voir aussi les problèmes corrigés)
- Instabilité de Kelvin-Helmholtz

$$V_G \geq C_2 \left[\frac{(\rho_L - \rho_G) \cos \beta A_G}{\rho_G \frac{dA_L}{dh}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad C_2 \approx 1 - \frac{h}{D}$$

- Ecoulement de base : interface lisse et horizontale

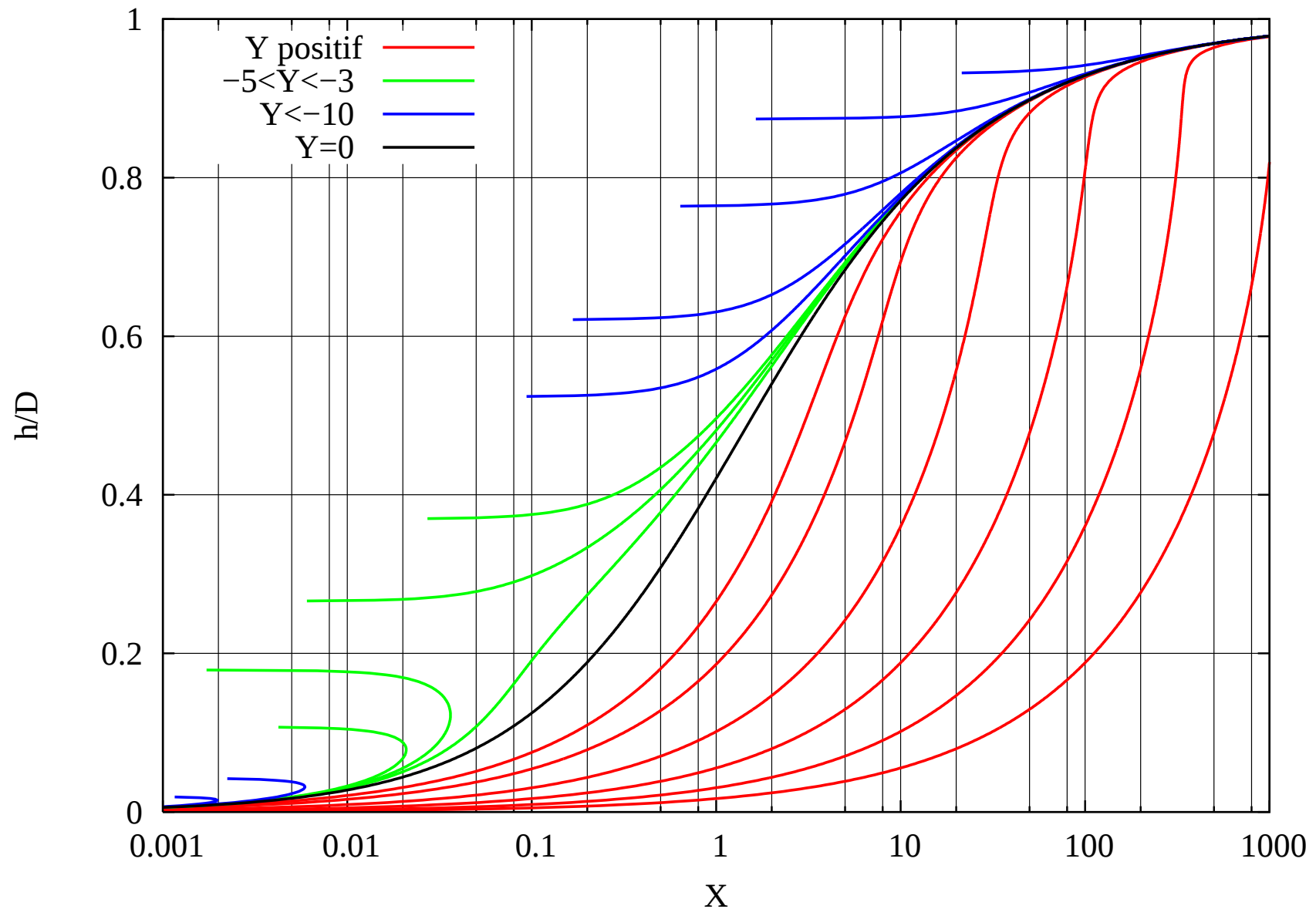
$$\tau_G \frac{S_G}{A_G} - \tau_L \frac{S_L}{A_L} + \tau_i \left(\frac{S_i}{A_L} + \frac{S_i}{A_G} \right) + (\rho_L - \rho_G) g \sin \beta = 0$$

$$X^2 f(A, D, A_L, P_L, D_L) - g(A, D, A_G, P_G, D_G, P_i) - 4Y$$

$$X^2 = \frac{\frac{1}{2} C_L \rho_L J_L^2 Re_{LS}^{-n}}{\frac{1}{2} C_G \rho_G J_G^2 Re_{GS}^{-n}} = \left| \frac{(dP/dz)_{LS}}{(dP/dz)_{GS}} \right|.$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G) g \sin \beta}{\frac{4}{D} \frac{1}{2} \rho_G J_G^2 C_G Re_G^{-m}}$$

LE MODELE DE TAITEL ET DUKLER (1976)



LE MODELE DE TAITEL ET DUKLER (1976)

- Transition à partir de l'écoulement stratifié :

$$F^2 \left(\frac{1}{C_2^2} \frac{\tilde{U}_G^2 \frac{d\tilde{A}_G}{d\tilde{h}}}{\tilde{A}_G} \right) \geq 1, \quad \tilde{U}_G = \frac{A}{A_G}, \quad F = \left(\frac{\rho_G}{\rho_G - \rho_L} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{J_G}{(Dg \cos \beta)^{\frac{1}{2}}}$$

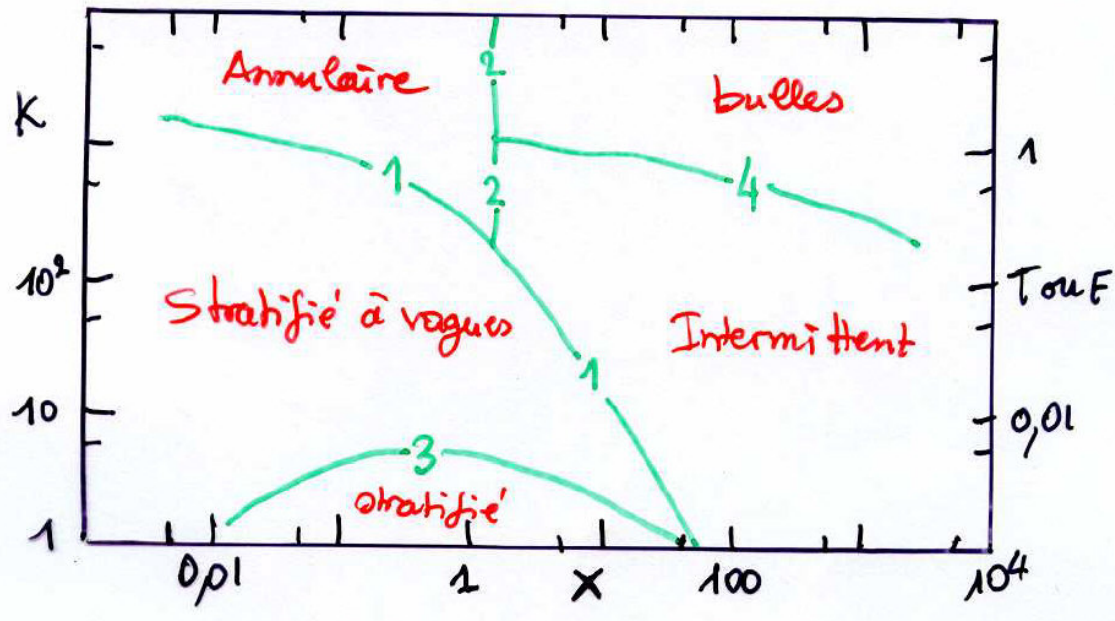
- Vers l'écoulement intermittent : $\frac{h}{D} \geq 0,5$
- Vers l'écoulement annulaire : $\frac{h}{D} \leq 0,5$
- Ecoulement stratifié lisse-stratifié à vagues :

$$U_G \geq \left(\frac{4\nu_L(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta}{s\rho_G U_L} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad K \geq \frac{2}{\tilde{U}_G \sqrt{s\tilde{U}_L}}, \quad K^2 = \left(\frac{\rho_G J_G^2}{(\rho_L - \rho_G)Dg \cos \beta} \right) \left(\frac{DJ_L}{\nu_L} \right)$$

- Ecoulement dispersé :

$$U_L \geq \left(\frac{4A_G}{S_i} \frac{g \cos \beta}{f_L} \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad T^2 \geq \frac{8\tilde{A}_G}{\tilde{S}_i \tilde{U}_L^2 (\tilde{U}_L \tilde{D}_L)^{-n}}, \quad T = \left(\frac{\left| \frac{dp}{dz} \right|_{LS}}{(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta} \right)^{\frac{1}{2}}$$

LE MODELE DE TAITEL ET DUKLER (1976)



Courbes	1 et 2	3	4
Coordonnées	F, X	K, X	T, X

$$K = \left(\frac{\rho_G J_G^2}{(\rho_L - \rho_G) D g \cos \beta} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D J_L}{\nu_L} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$F = \left(\frac{\rho_G}{\rho_G - \rho_L} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{J_G}{(D g \cos \beta)^{\frac{1}{2}}}$$

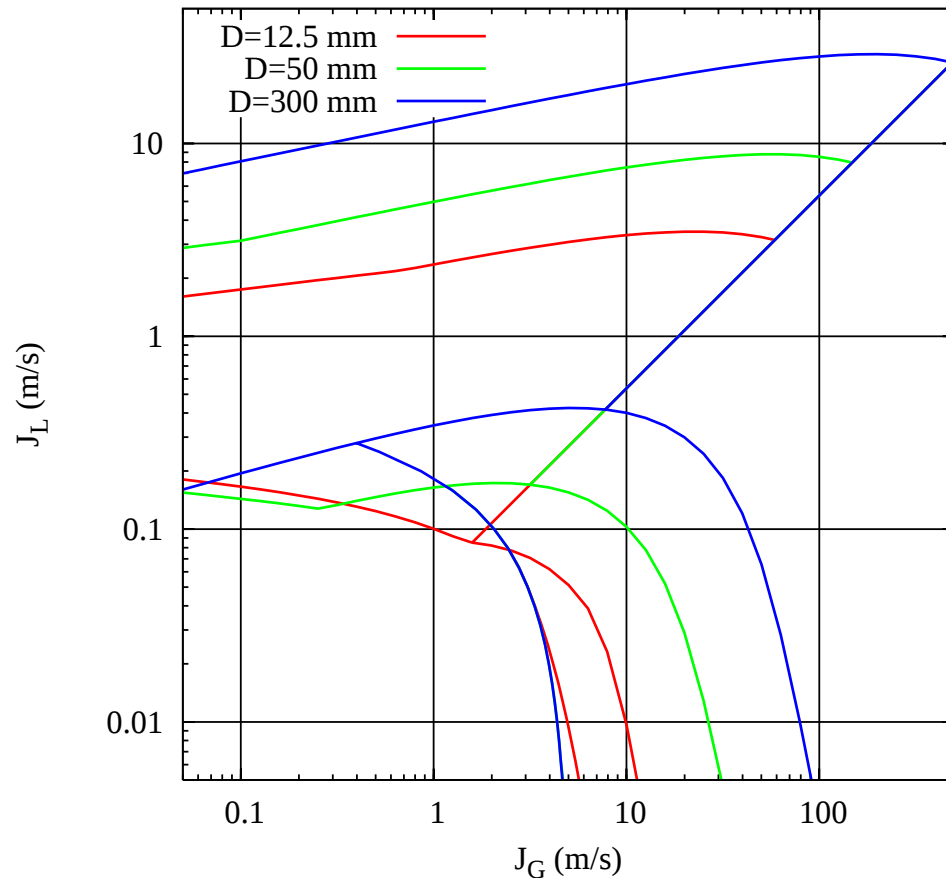
$$T = \left(\frac{\left| \frac{dp}{dz} \right|_{LS}}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \beta} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$X = \left| \frac{(dP/dz)_{LS}}{(dP/dz)_{GS}} \right|^{\frac{1}{2}}$$

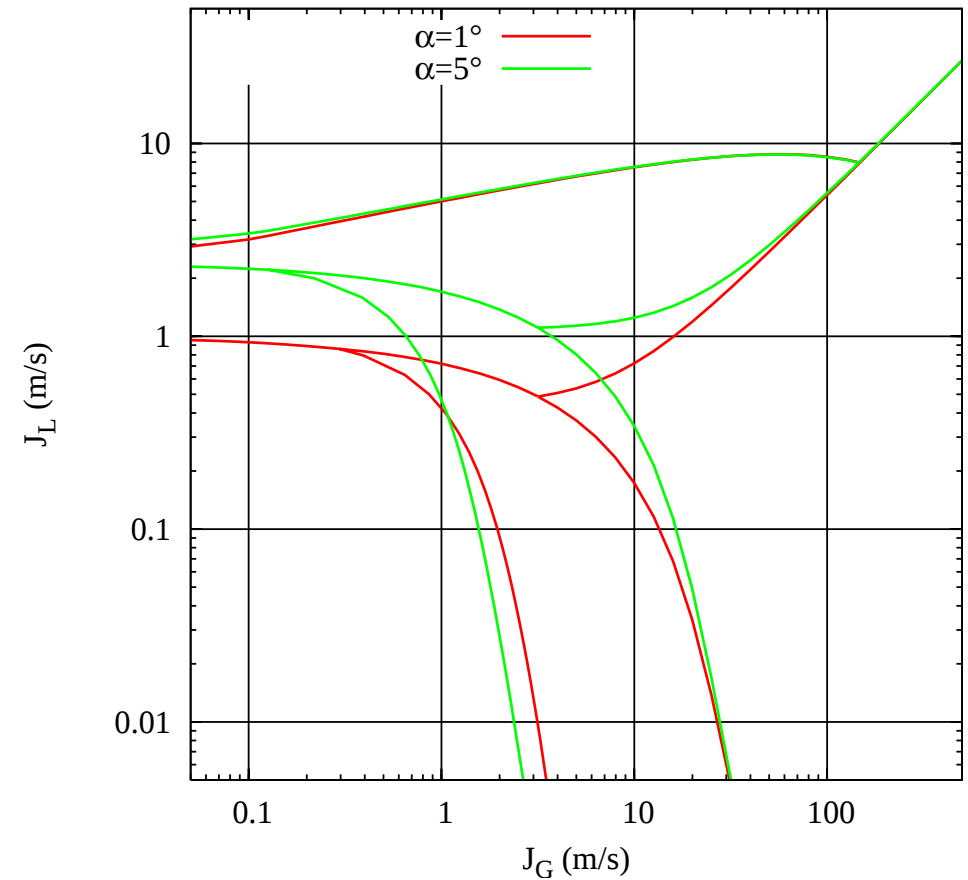
$$\left| \frac{dp}{dz} \right|_S = \frac{4C}{D} \text{Re}^{-n} \frac{\rho J^2}{2}, \quad \text{Re} = \frac{J D}{\nu}$$

- Laminaire : $C = 16, n = 1$, turbulent : $C = 0,046, n = 0,2$
- β : inclinaison sur l'horizontale, écoulement descendant, $\beta > 0$

APPLICATIONS : HoriTD03

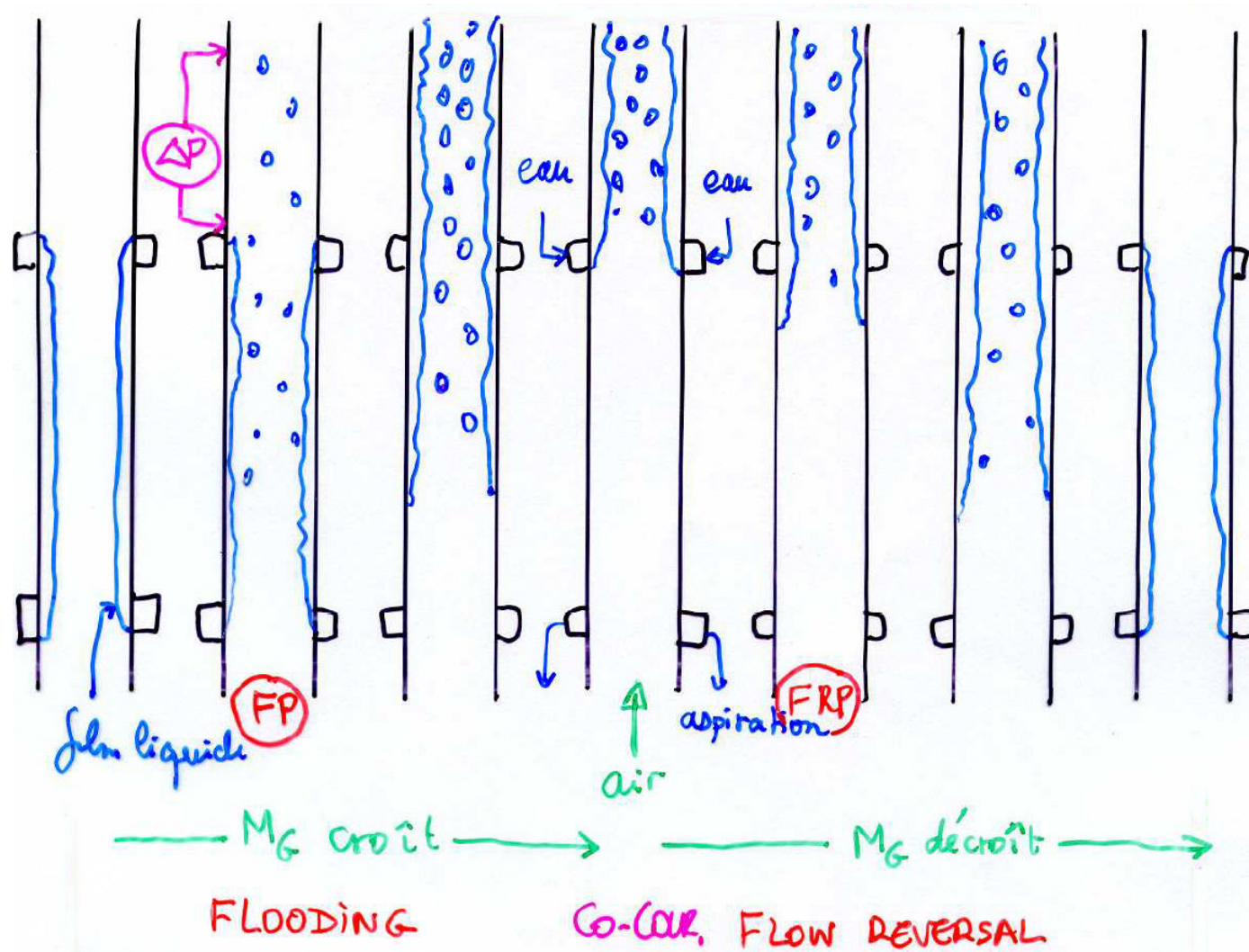


Eau-air, 50 mm, 1 bar, $\beta = 0$



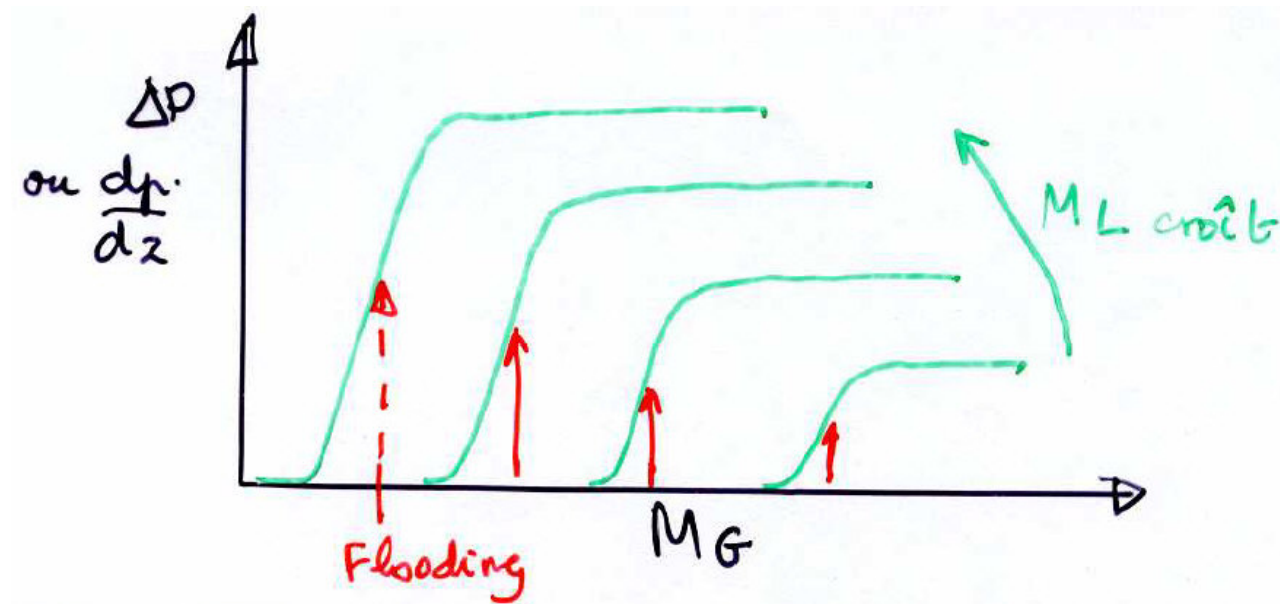
Eau-air, 50 mm, 1 bar

FLOODING AND FLOW REVERSAL



Transition contre-courant, co-courant, engorgement.

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE



Modélisation des transition de *flooding* et de *flow reversal*: [Bankoff & Chun Lee \(1986\)](#).

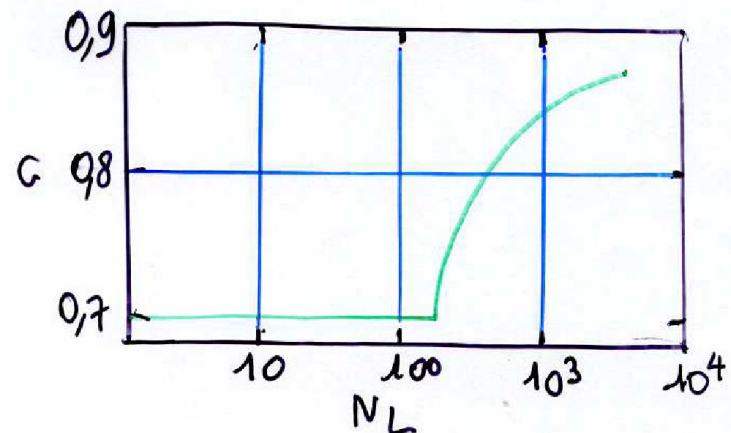
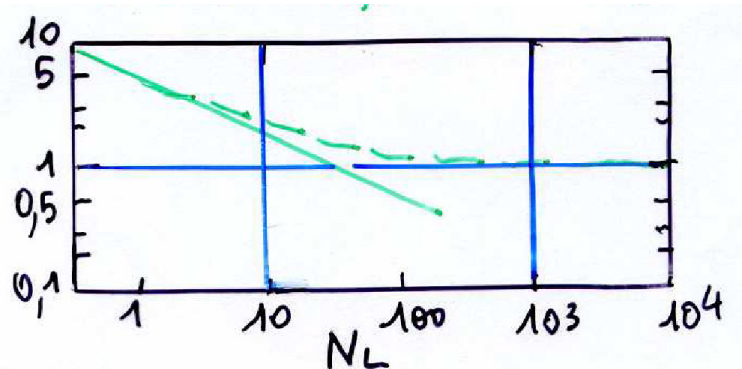
MODELE DE WALLIS

$J_k^* \approx$ un nombre de Froude.

$$J_G^* = \frac{J_G \rho_G^{\frac{1}{2}}}{(gD(\rho_L - \rho_G))^{\frac{1}{2}}}, \quad J_L^* = \frac{J_L \rho_L^{\frac{1}{2}}}{(gD(\rho_L - \rho_G))^{\frac{1}{2}}}, \quad \boxed{J_G^{*\frac{1}{2}} + m J_L^{*\frac{1}{2}} = C}$$

m et C fonctions de $N_L = \left(\frac{\rho_L g D^3 (\rho_L - \rho_G)}{\mu_L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \equiv Gr$

$$N_L > 1000 \begin{cases} m = 1 \\ 0,88 < C < 1 \text{ (bords arrondis)} \\ C = 0,725 \text{ (bords vifs)} \end{cases}, \quad N_L < 1000 \begin{cases} m = 5,6 N_L^{-1/2} \\ C = 0,725 \end{cases}$$



FLOODING ET FLOW REVERSAL

- Modèle de Wallis : pas d'effet de longueur
 - L'expérience montre que J_G^* croît avec L , en faveur du mécanisme d'instabilité
 - Autres corrélations : spécifiques à la géométrie
- Flow reversal
 - Modèle de Wallis $J_G^*(\text{FR}) \neq J_G^*(\text{Flooding})$, hystérésis, effet de diamètre

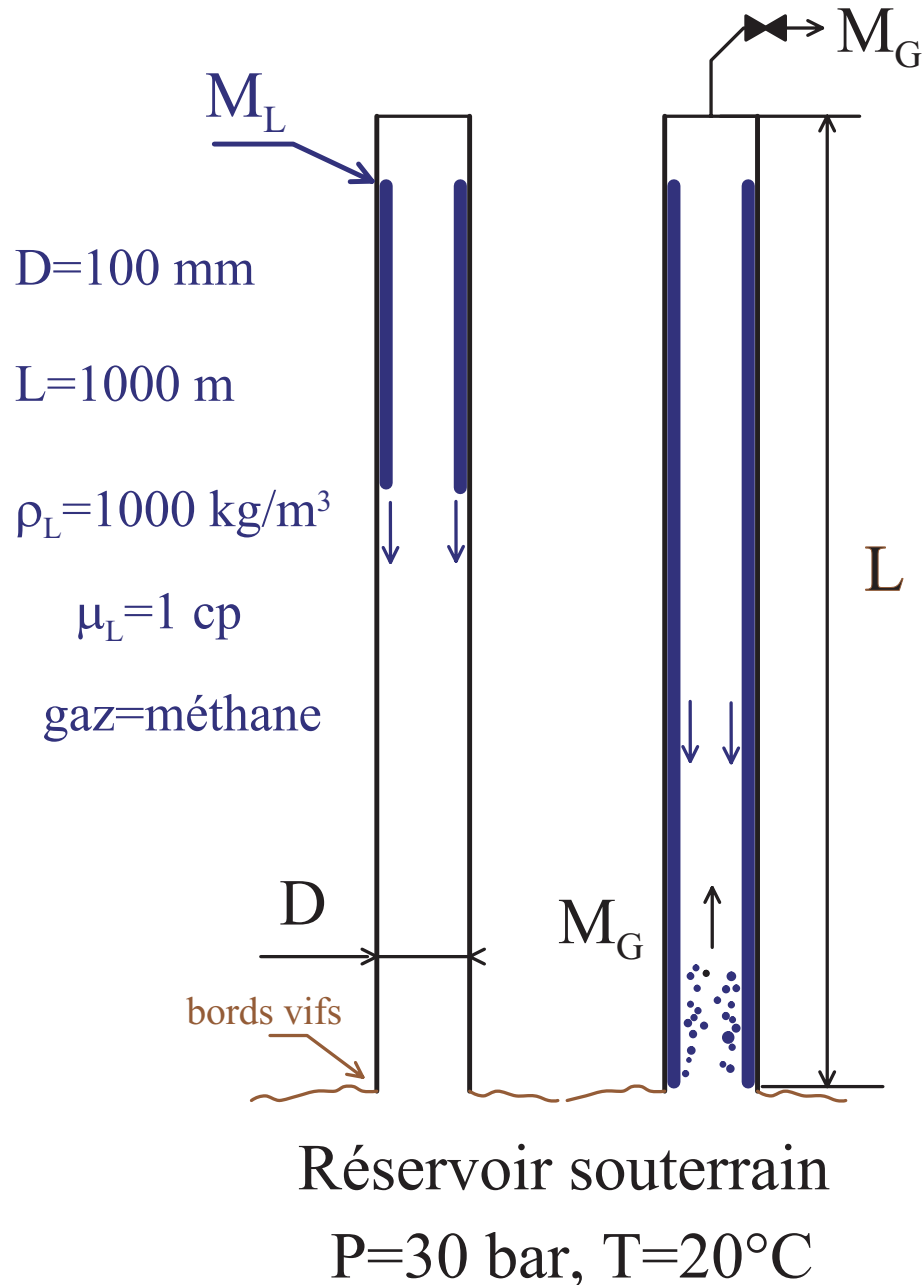
$$J_G^* = \frac{J_G \rho_G^{\frac{1}{2}}}{(gd(\rho_L - \rho_G))^{\frac{1}{2}}} = 0,5$$

- Modèle de Puskina et Sorokin

$$Ku = \frac{J_G \rho_G^{\frac{1}{2}}}{(g\sigma(\rho_L - \rho_G))^{\frac{1}{4}}} = 3,2$$

- Mécanismes et modélisation : problème ouvert

MISE EN ROUTE D'UN STOCKAGE DE GAZ



- La détente des gaz (CH_4 , H_2O , ...) produit des hydrates qui se déposent sur la conduite et réduisent la production. Pour inhiber la formation des hydrates on utilise un inhibiteur chimique que l'on souhaite recycler pour réduire l'impact sur l'environnement.
- 1 Tapisser le conduit d'un film d'un mm d'épaisseur. Calculer M_L et T_1
 - 2 Calculer le débit de gaz minimum évitant la perte de l'inhibiteur dans le forage, M_{Gmin}
- Une solution à ce problème se trouve dans ce chapitre

REFERENCES

- Bankoff, S. G., & Chun Lee, Sang. 1986. *Multiphase Science and Technology*. Vol. 2. Hemisphere. Chap. 2-A critica review of the flooding literature, pages 95–180.
- Dukler, A. E., & Taillel, Y. 1986. *Multiphase Science and Technology*. Vol. 2. Hemisphere. [Lien](#). Chap. 1-Flow pattern transitions in gas-liquid systems: measurement and modelling, pages 1–94.