

Mise au point et qualification d'une technique de mesure du taux de présence local par tomographie à rayons X

Emmanuel JOUET

Thèse préparée au
CEA Grenoble, DEN / DTP / SETEX / LTAC

- ♦ Directeur : Laurent DESBAT (TIMC-IMAG)
- ♦ Responsable CEA : Eric HERVIEU

Plan de la présentation

- ♦ Contexte et objectif
- ♦ Dispositif expérimental
- ♦ Choix et optimisation de l'algorithme
- ♦ Application aux écoulements diphasiques
- ♦ Conclusions et perspectives

Contexte : Thermohydraulique Avancée

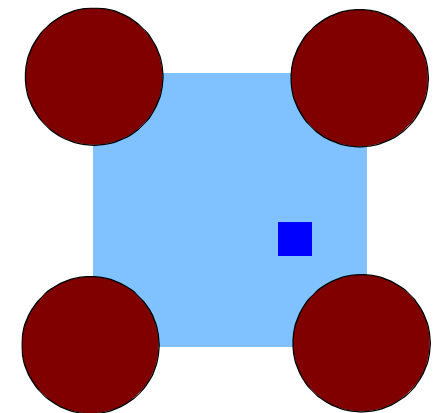
♦ Besoin d'outils de simulation des écoulements diphasiques (REP, génie chimique, transport pétrolier, ...)

⇒ Accès aux grandeurs locales

⇒ Développement de modèles locaux et validation associée

⇒ Besoin en instrumentation locale :

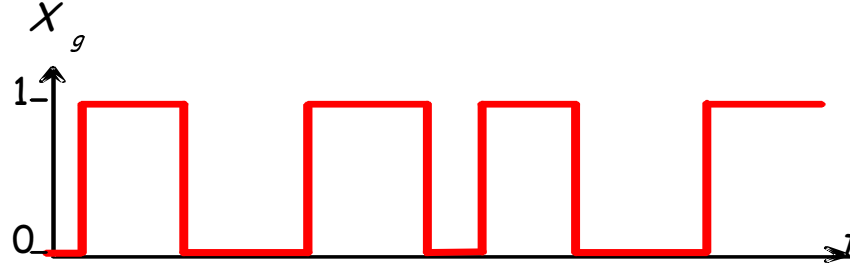
- aire interfaciale volumique
- vitesses phasiques
- **taux de présence local d'une phase**



Taux de présence local

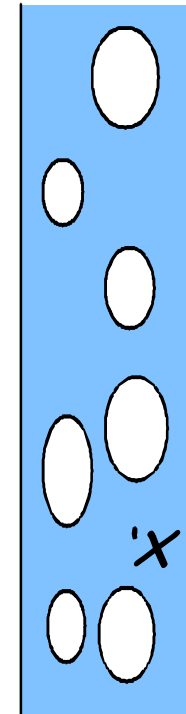
♦ Fonction indicatrice de phase

$$X_g(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \text{ est dans la phase gazeuse} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$



♦ Calcul du taux de présence local

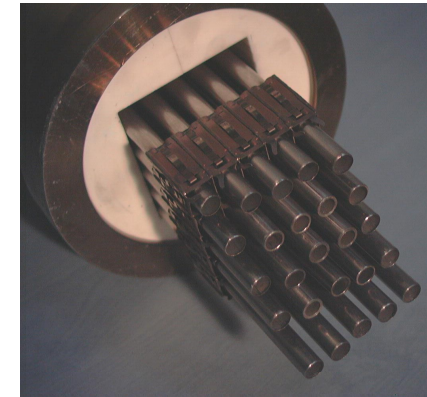
$$\alpha(x, t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} X_g(x, \tau) d\tau = \frac{T_g}{T}$$



Choix d'une méthode de mesure

♦ Méthodes intrusives :

- Perturbation de l'écoulement
- Conditions de fonctionnement limitantes
- Déplacements difficiles



♦ Méthodes non-intrusives :

- Visualisation : faible valeur de taux de présence local
- Ultrasons : utilisation en écoulements à phases dispersées
- Tomographie électrique : problème inverse très mal posé
- RMN : intéressante, mais contraintes fortes dans notre contexte

⇒ **Méthode retenue : tomographie à rayons X**

Etat de l'art

Equipe	Date	Conditions De fonctionnement	Résolution	Validation
Jeandey (CEA)	1982	Ecoulements axisymétriques ou stratifiés	$2 \times 2 \text{ mm}^2$	Absente
Inoue	1993	Ecoulements autour de grappes	$0,3 \times 0,3 \text{ mm}^2$	Absente
Schmitz	1997	Ecoulements autour de billes	$0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$	Absente
Hori	1997	Ecoulements quelconques (2000 images par s)	$1 \times 1 \text{ mm}^2$	Fantômes
Grassler	1999	Lits fluidisés	$0,8 \times 0,8 \text{ mm}^2$	Fantômes

♦ Pas de validation locale en écoulements

Objectif de la thèse

- ♦ Développement et qualification d'un instrument de cartographie en deux dimensions du taux de présence local d'un écoulement eau-air stationnaire par tomographie à rayons X
- ♦ Objectif en résolution : 1 mm²
- ♦ Objectif en précision : la meilleure possible et quantifiée
- ♦ Action cofinancée :
CEA-DEN, CEA-IPSN, EDF, FRAMATOME-ANP

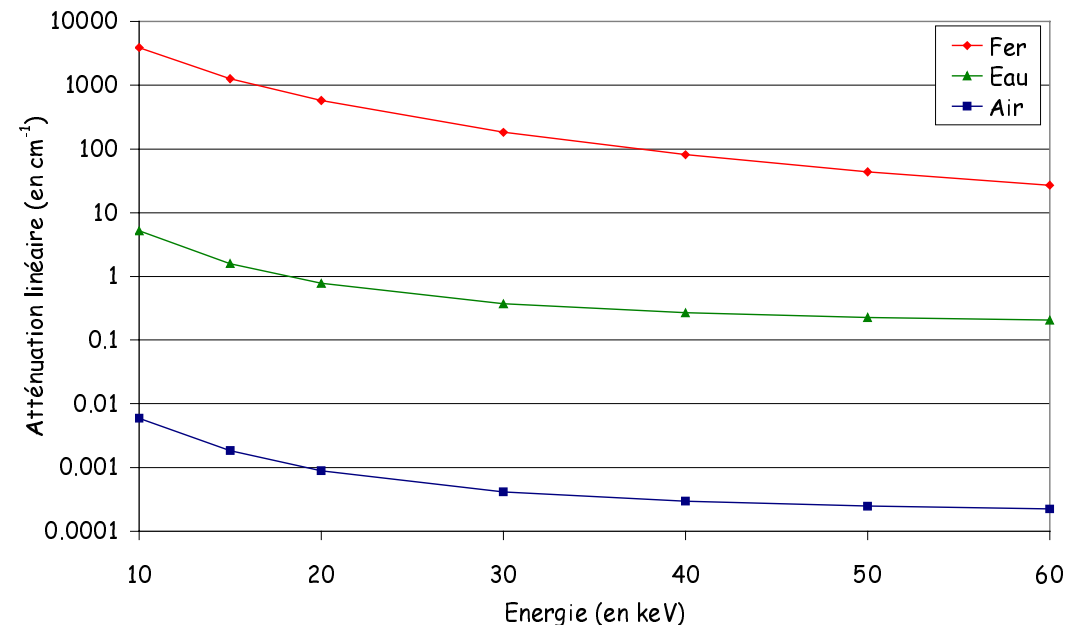
Principe de la tomographie à rayons X

- ♦ Pour un faisceau X collimaté, monochromatique, atténuation des rayons X dépend :
 - de la nature des matériaux traversés,
 - de leurs épaisseurs.

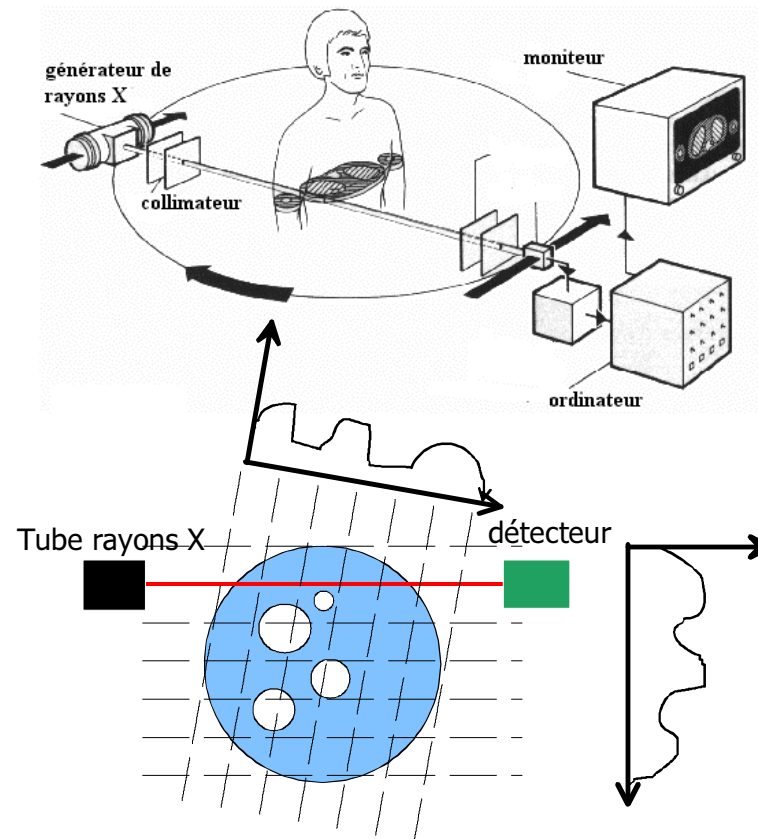
$$I = I_{\text{incident}} e^{-\int_{\text{rayon}} \mu(s) ds}$$

- ♦ Atténuation linéique :

$$\int_{\text{rayon}} \mu(s) ds = \ln \left(\frac{I_{\text{incident}}}{I} \right)$$



Principe de la tomographie à rayons X



- ♦ Mesures d'atténuation linéique et algorithmes de reconstruction

- ⇒ carte d'atténuation

- ⇒ carte du taux du présence local

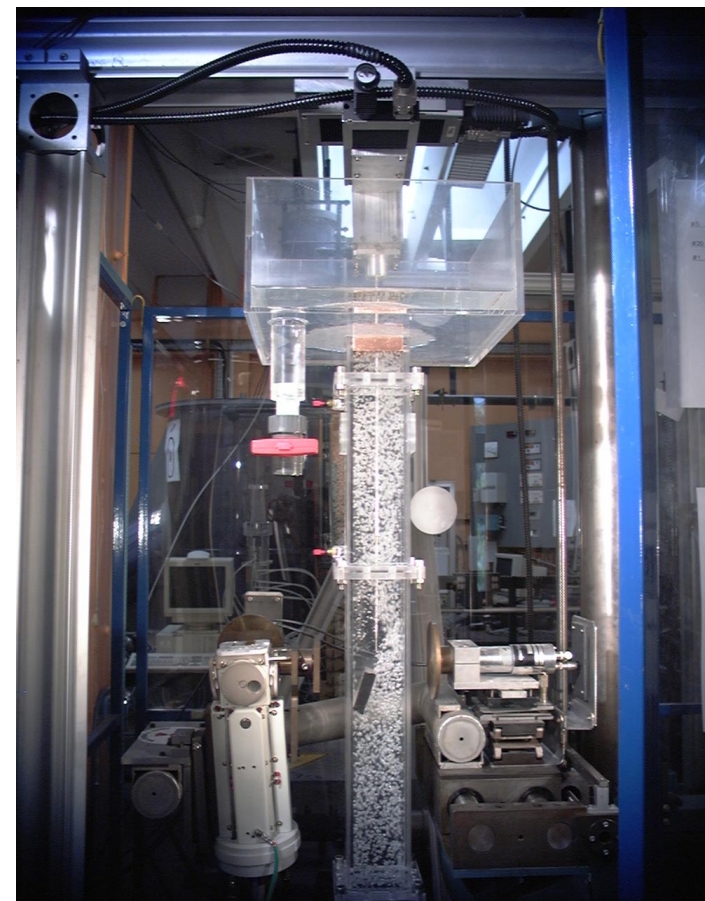
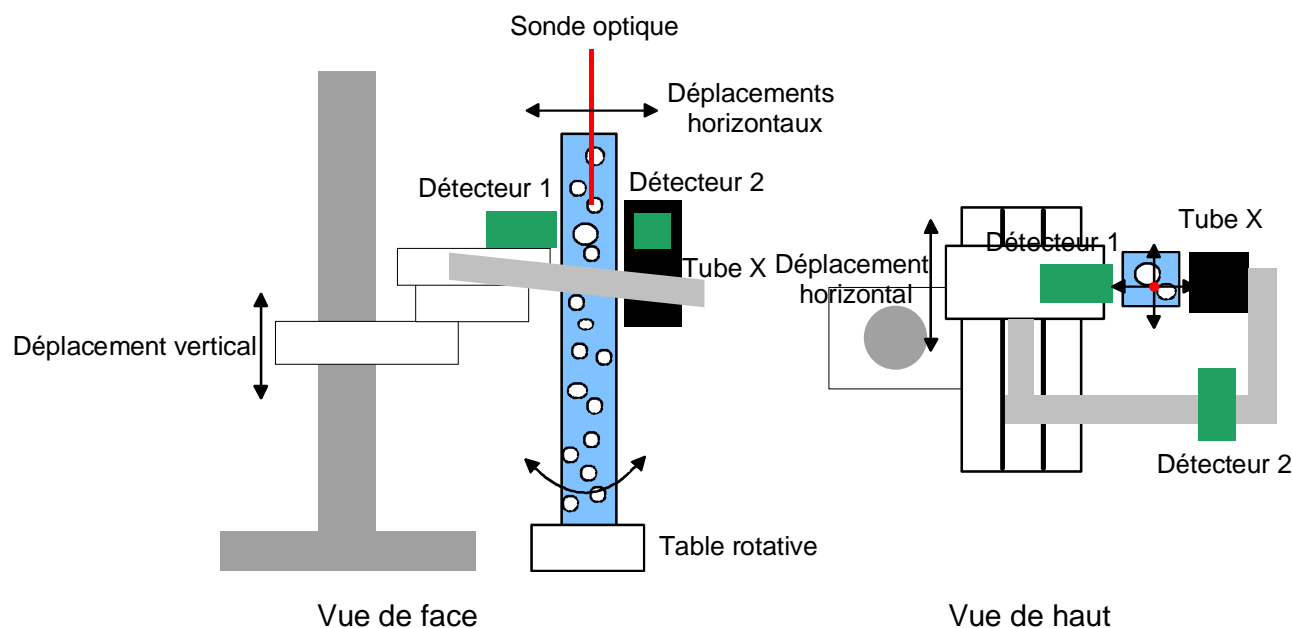
Deux étapes :

- ♦ Réalisation de mesures en géométrie parallèle
- ♦ Développement d'un algorithme de reconstruction

Plan de la présentation

- ♦ Contexte et objectif
- ♦ Dispositif expérimental
- ♦ Choix et optimisation de l'algorithme
- ♦ Application aux écoulements diphasiques
- ♦ Conclusions et perspectives

Dispositif Mini-TOMIX



- ♦ Mise en œuvre et programmation
- ♦ Optimisation des paramètres de fonctionnement :
 - ♦ durcissement du faisceau
 - ♦ acquisition

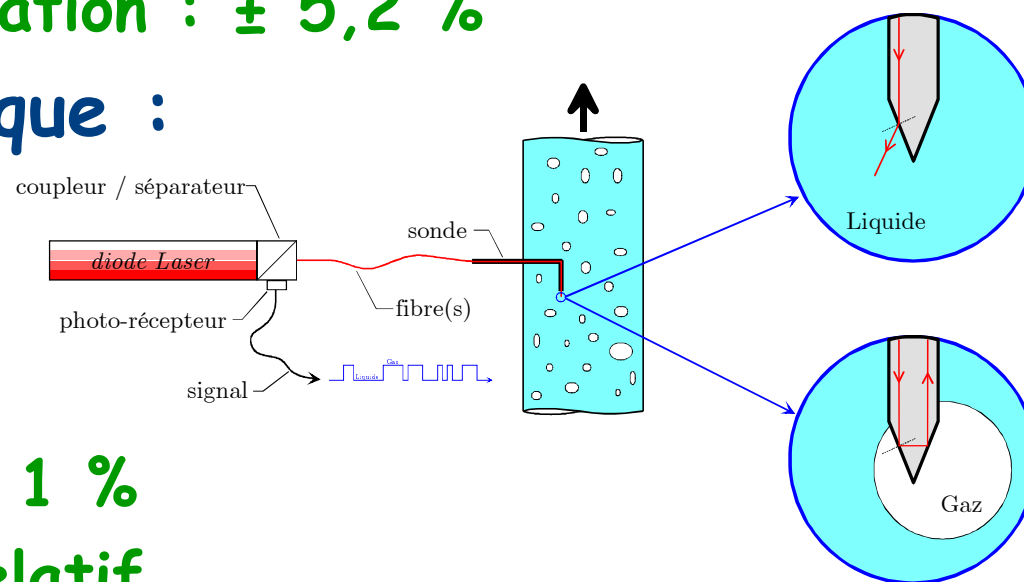
Dispositif Mini-TOMIX

♦ Mesure tomographique :

- Tube à rayons X : 40 kV, 5 mA
 - Faisceaux collimatés à 0,5 mm
 - Signaux des photomultiplicateurs filtrés par un filtre passe-bas à 10 Hz
 - Acquisition de 300 points à 20 Hz
- ⇒ Incertitude sur l'atténuation : $\pm 5,2 \%$

♦ Mesure par sonde optique :

- Développée au LTAC
- ⇒ Incertitude absolue : $\pm 1 \%$
- Convergence à $\pm 1 \%$ relatif

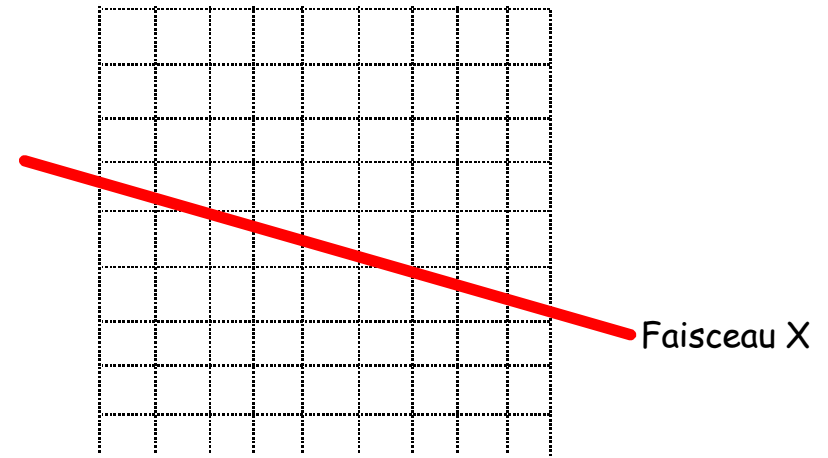


Plan de la présentation

- ♦ Contexte et objectif
- ♦ Dispositif expérimental
- ♦ **Choix et optimisation de l'algorithme**
- ♦ Application aux écoulements diphasiques
- ♦ Conclusions et perspectives

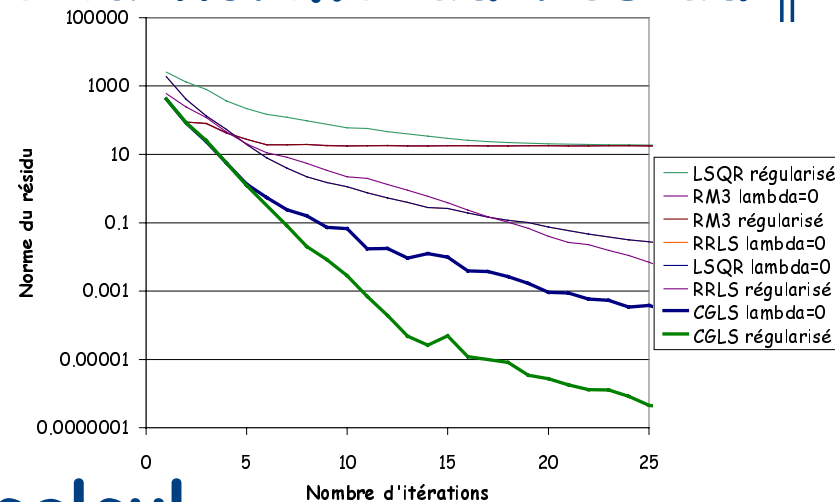
Choix de l'algorithme

- ♦ Algorithmes analytiques
 - Formule analytique
 - Difficulté d'informations a priori
- ♦ Algorithmes algébriques
 - Discrets
 - Résolution d'un système linéaire : $RF = P$
 - Facilité d'informations a priori
 - Application à d'autres géométries d'échantillonnage
- ♦ Comparaisons des algorithmes sur des mesures simulées de fantôme :
 - LSQR ;
 - Résidu Minimal ;
 - RRLS ;
 - CGLS.

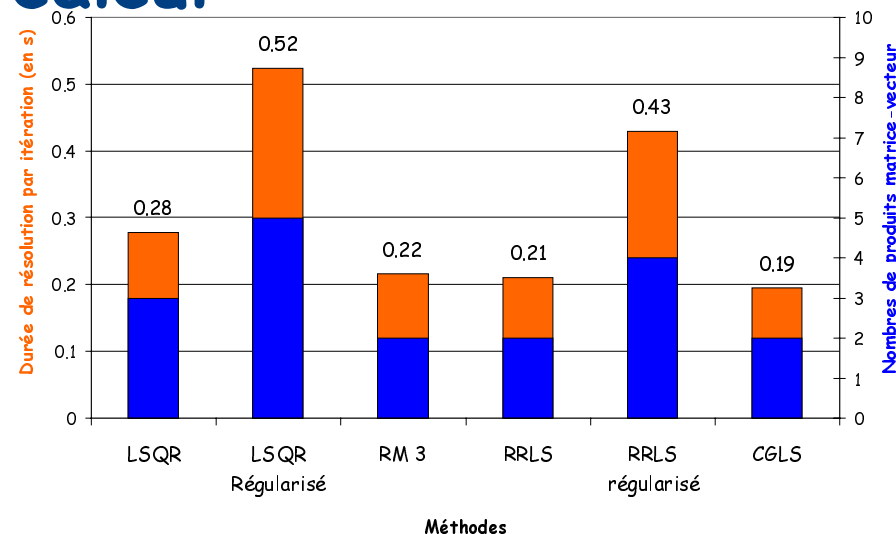


Choix de l'algorithme

♦ Evolution de la norme du résidu $\|P - RF\|$

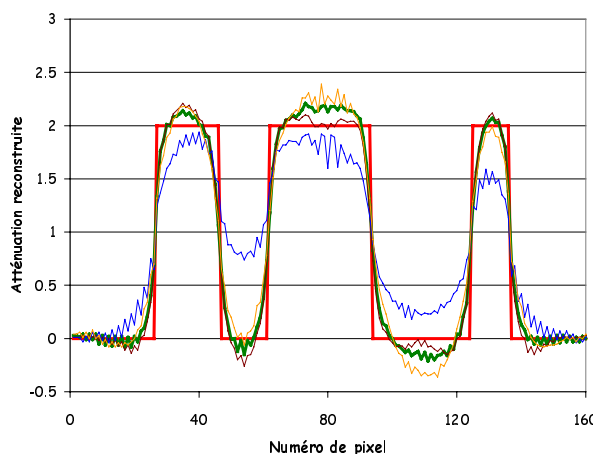
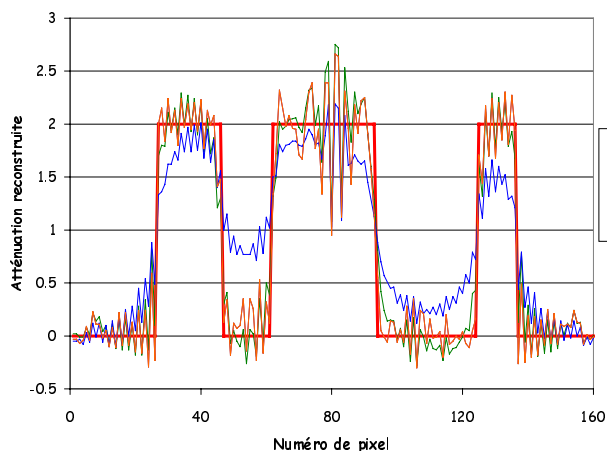


♦ Temps de calcul

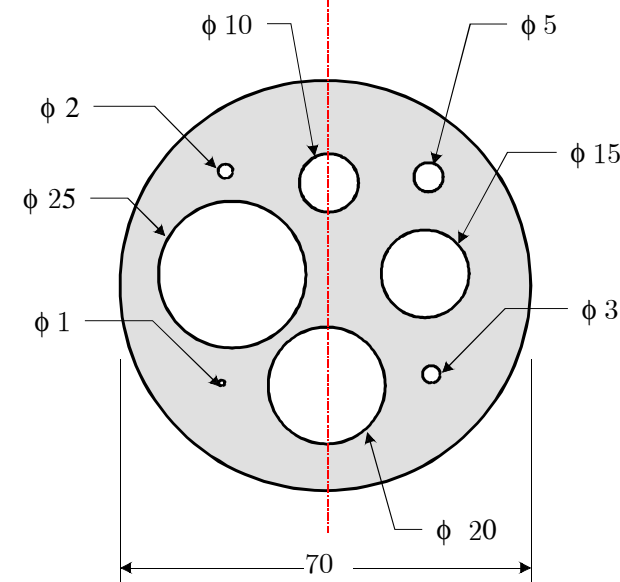
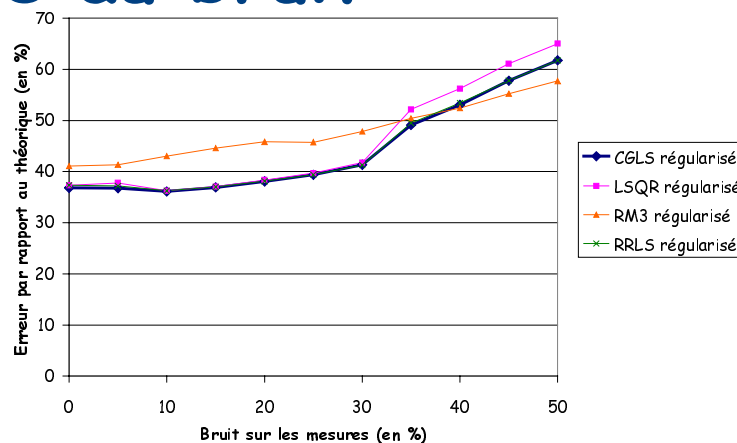


Choix de l'algorithme

♦ Fidélité à l'original



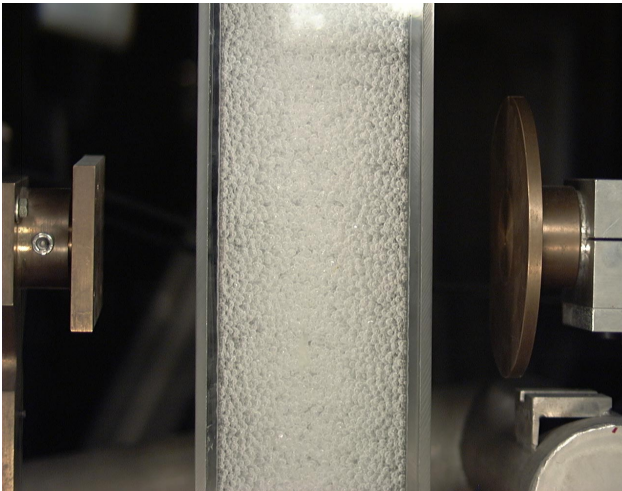
♦ Réponse au bruit



127 rotations, 81 translations,
image de 160 pixels de côté

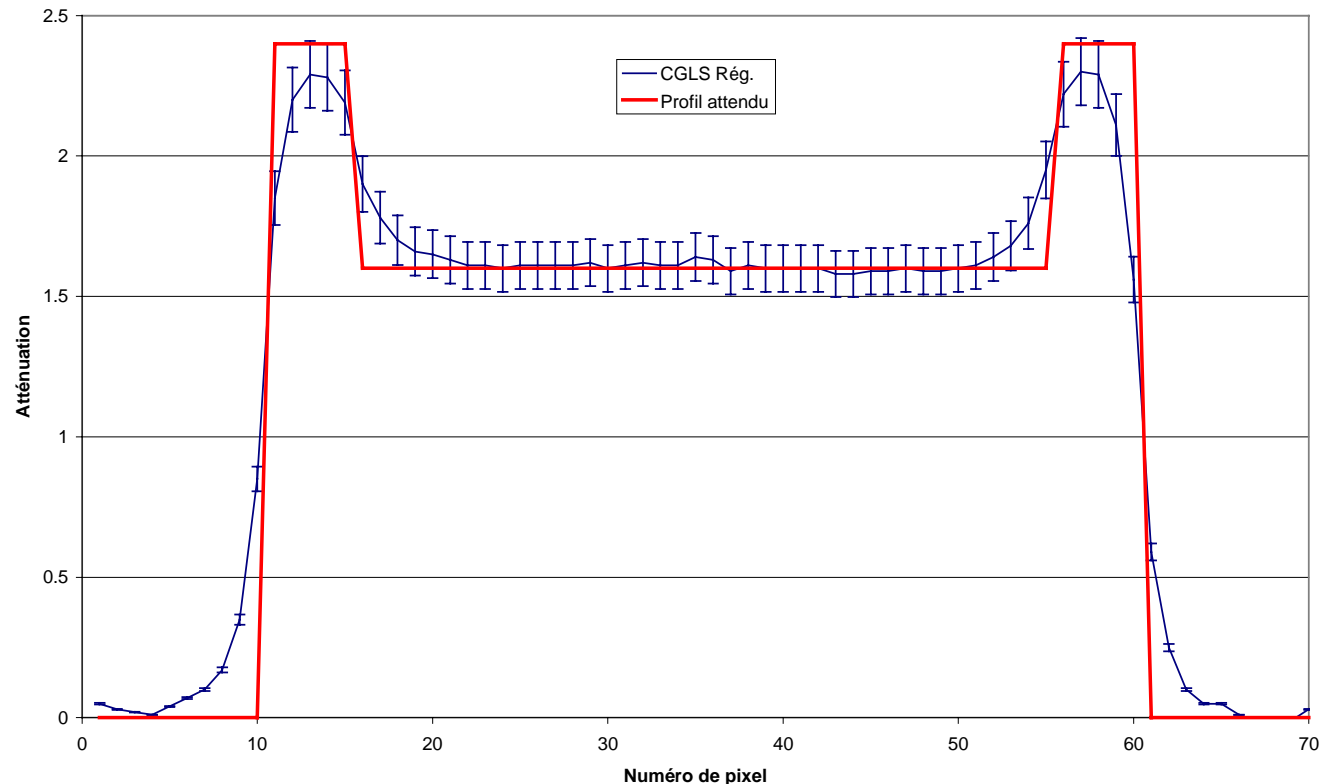
⇒ **Choix de CGLS Régularisé**

Reconstruction d'un écoulement réel



Bulles de ϕ de 2 à 5 mm
Vitesse de 20 à 30 cm.s^{-1}

Débit d'air : 14 NI/min ,
109 rotations sur 180° , 70 projections, image de 70 pixels de côté

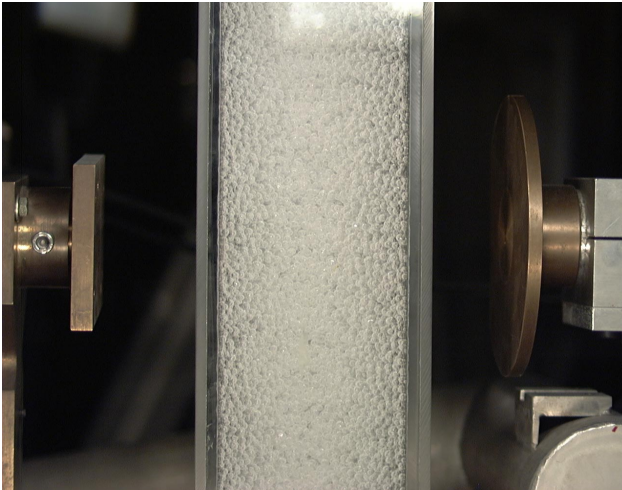


Taux de présence local moyen : 25 %
Ecart absolu maximal : 16 %

Imprécision au voisinage de la paroi

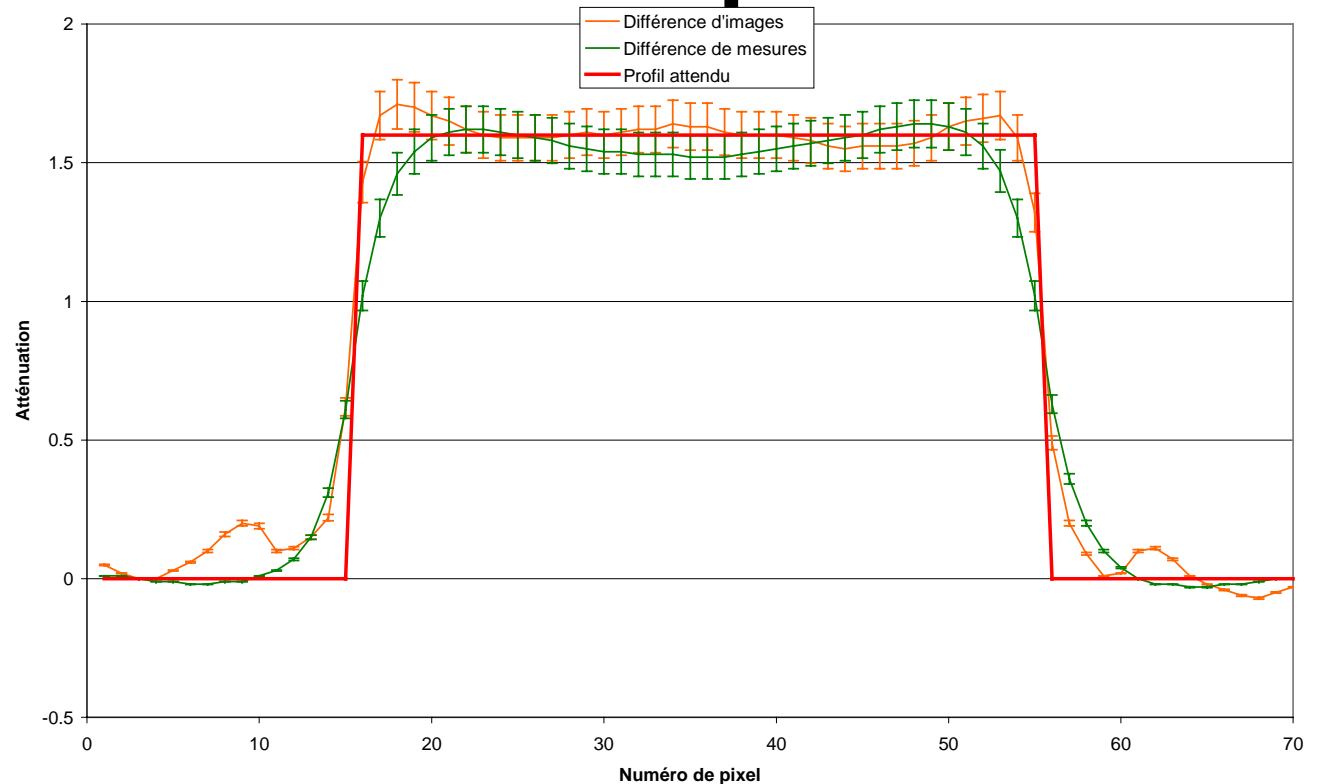
⇒ **Soustraction de la paroi**

Reconstruction d'un écoulement réel : soustraction de la paroi



Bulles de ϕ de 2 à 5 mm
Vitesse de 20 à 30 cm.s^{-1}

Débit d'air : 14 NI/min ,
109 rotations sur 180° , 70 projections, image de 70 pixels de côté



Taux de présence local moyen : 25 %

Ecart absolu maximal :

- Pour la différence d'images : 13 %

- Pour la différence de mesures : 27 %

Toujours imprécision au voisinage de la paroi

⇒ Besoin d'amélioration du CGLS régularisé

Améliorations testées

♦ Méthode de V. La (LETI, 1997)

$$\text{Minimisation de } \|P - RF\|^2 + \|\Lambda CF\|^2$$

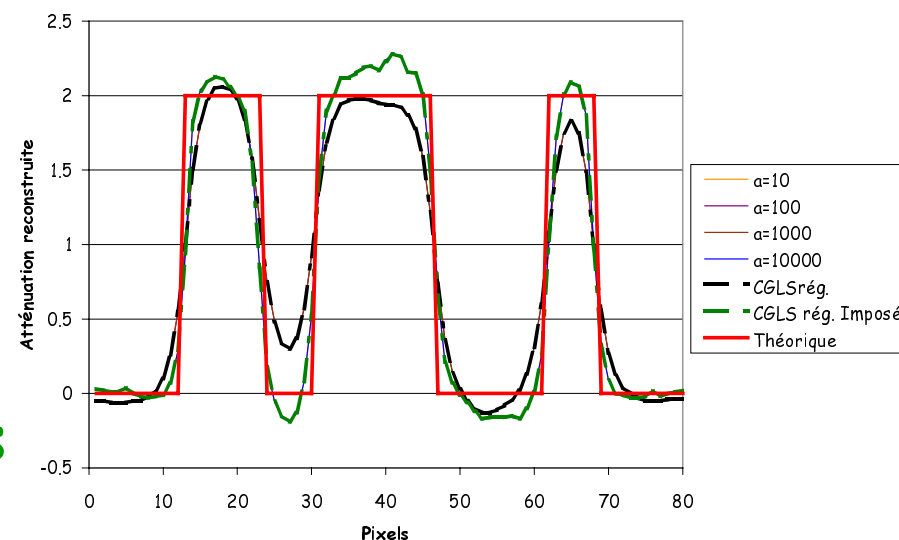
$$\Leftrightarrow (R^t R + \Lambda C^t C) F = R^t P$$

Lissage spatialement variant :

$$\Lambda(i, i) = \begin{cases} \lambda & \text{si } F(i) - F(i-1) < \delta \\ \frac{\lambda}{a} & \text{si } F(i) - F(i-1) \geq \delta \end{cases}$$

Peu d'amélioration des fronts
dans notre cas

⇒ Abandon de la méthode



127 rotations, 81 translations,
image de 80 pixels de côté, $\delta=0,75$

Améliorations testées

♦ Méthode de P. Charbonnier (I3S, Nice-Sophia, 1994)

Minimisation de

$$\|P - RF\|^2 + \lambda \sum_{i,j} \left(\phi \left[(D_x F)_{i,j} \right] + \phi \left[(D_y F)_{i,j} \right] \right)$$

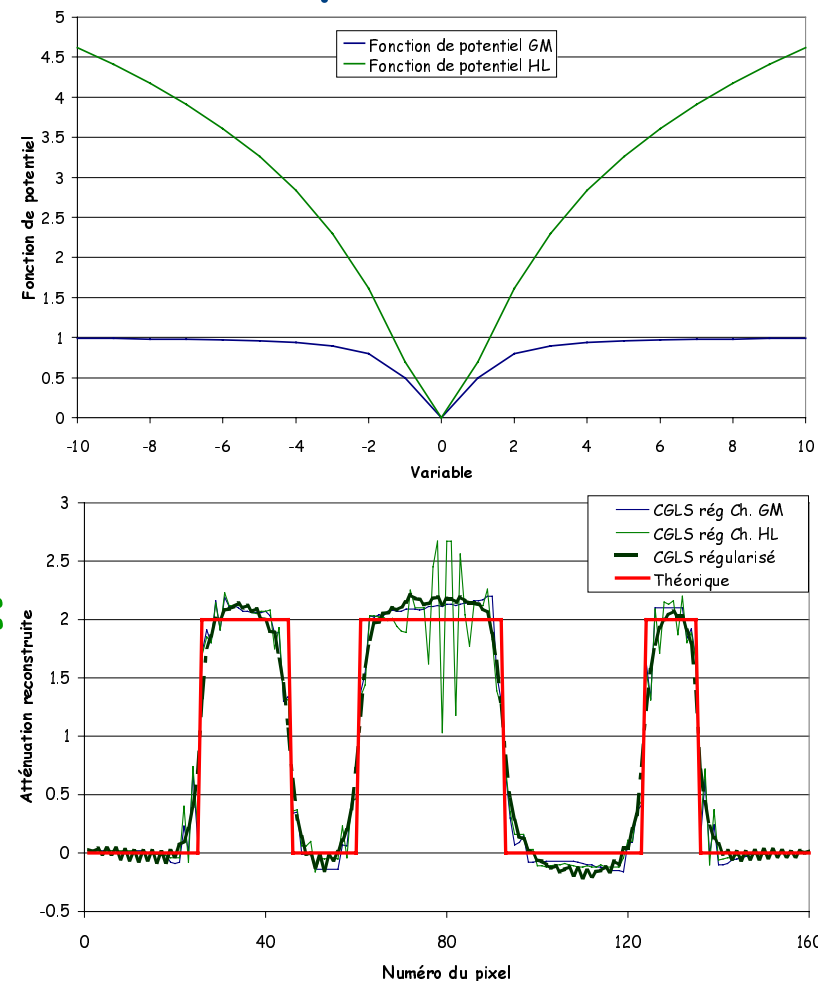
$$(D_x F)_{i,j} = \frac{F_{i,j+1} - F_{i,j}}{\delta} \quad \text{et} \quad (D_y F)_{i,j} = \frac{F_{i+1,j} - F_{i,j}}{\delta}$$

Recherche du paramètre d'échelle δ :

- manuelle
- automatique

Meilleure reconstruction des fronts

⇒ Insuffisante dans notre cas



127 rotations, 81 translations,
image de 160 pixels de côté

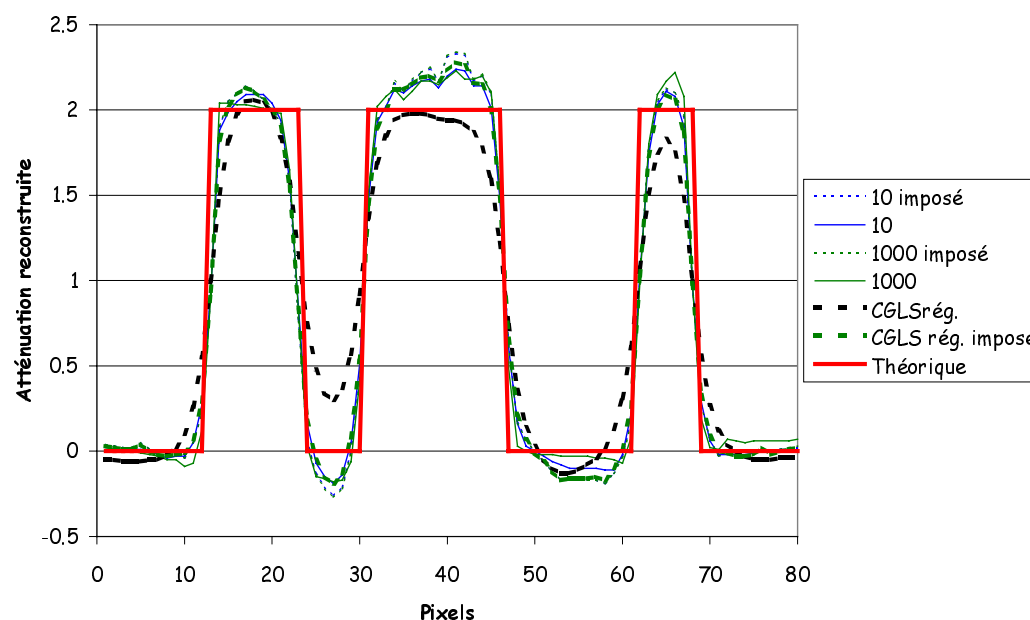
Améliorations proposées

♦ Introduction d'information a priori sur la régularisation

Géométrie de la section d'essais connue

⇒ Indication des pixels où régulariser peu

⇒ Application d'un diviseur



127 rotations, 81 translations,
image de 80 pixels de côté,
bande de 3 pixels

⇒ Peu d'amélioration des fronts dans notre cas

⇒ Abandon de la méthode

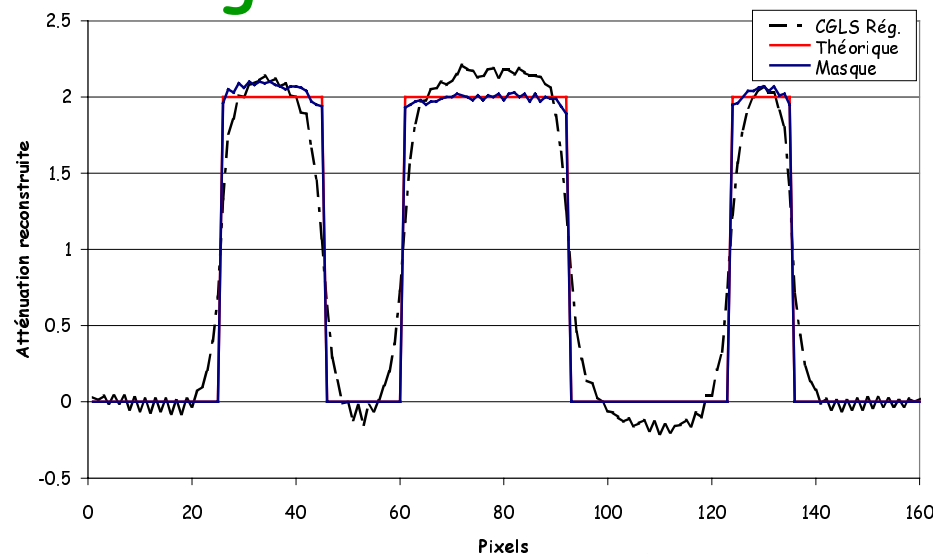
Améliorations proposées

♦ Introduction d'information a priori sur la géométrie Géométrie de la section d'essais connue

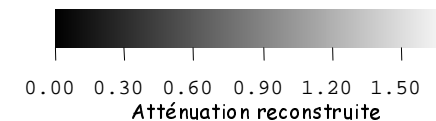
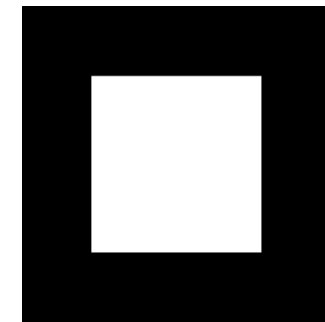
⇒ Utilisation d'un masque :

⇒ Indication de la région d'intérêt

⇒ Régularisation sur cette seule région



127 rotations, 81 translations,
image de 160 pixels de côté



127 rotations, 81 translations,
image de 74 pixels de côté

⇒ **Méthode du masque appliquée
après soustraction de la mesure des parois**

Plan de la présentation

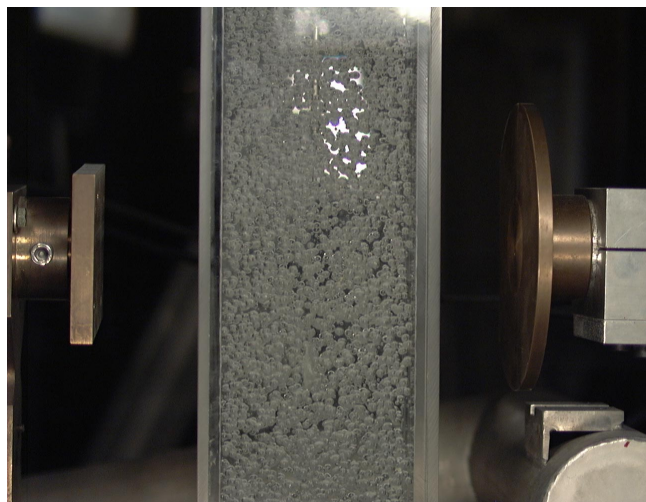
- ♦ Contexte et objectif
- ♦ Dispositif expérimental
- ♦ Choix et optimisation de l'algorithme
- ♦ Application aux écoulements diphasiques
- ♦ Conclusions et perspectives

Procédure expérimentale retenue

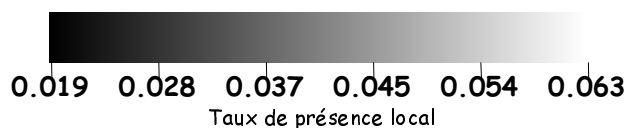
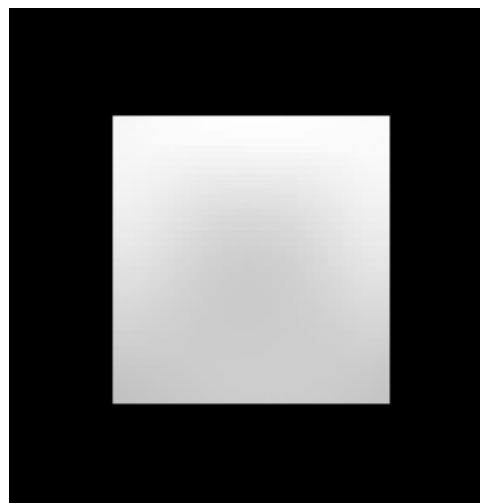
- ♦ Mesure de la section d'essais vide
 - ⇒ Création du masque
- ♦ Mesure de la section d'essais pleine d'eau
 - ⇒ Reconstruction par la méthode du masque de la différence des mesures pleine eau - vide : $\mu_{\text{pleine eau}}(i, j)$
- ♦ Mesure de la section d'essais à débit désiré
 - ⇒ Reconstruction par la méthode du masque de la différence des mesures débit - vide : $\mu_{\text{débit}}(i, j)$
- ♦ Calcul de la carte de taux de présence local :

$$\alpha(i, j) = 1 - \frac{\mu_{\text{débit}}(i, j)}{\mu_{\text{pleine eau}}(i, j)}$$

Mesure d'écoulement non dévié

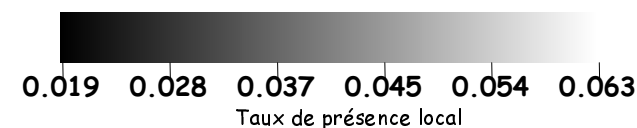


Bulles de ϕ de 2 à 5 mm
Vitesse de 20 à 30 cm.s^{-1}



CGLS Rég. masque

Moyenne : 5,7 %
Incertitude absolue : $\pm 9,5$ %

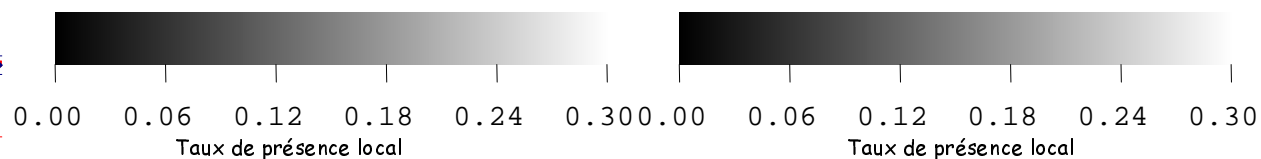
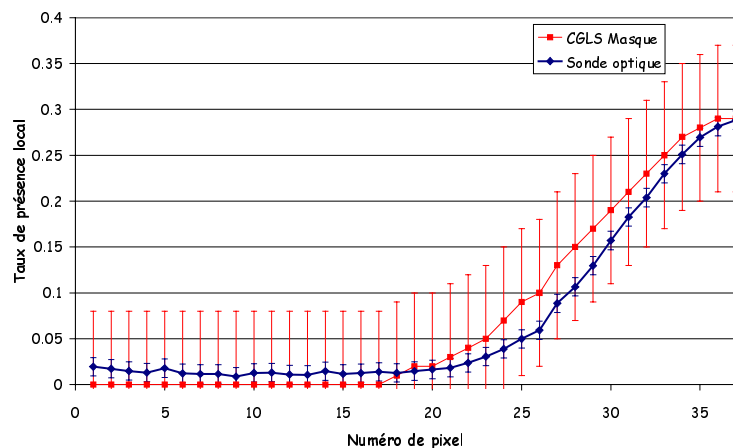
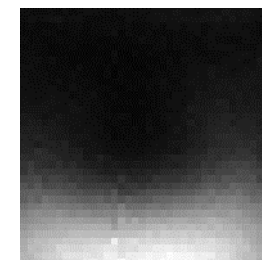
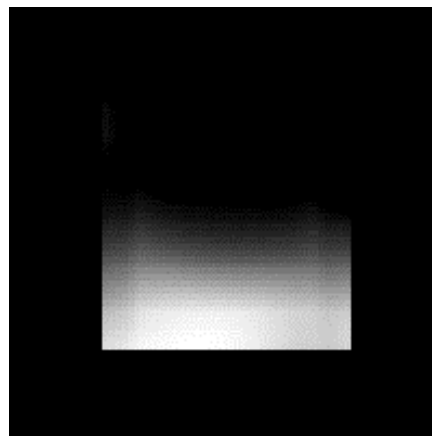
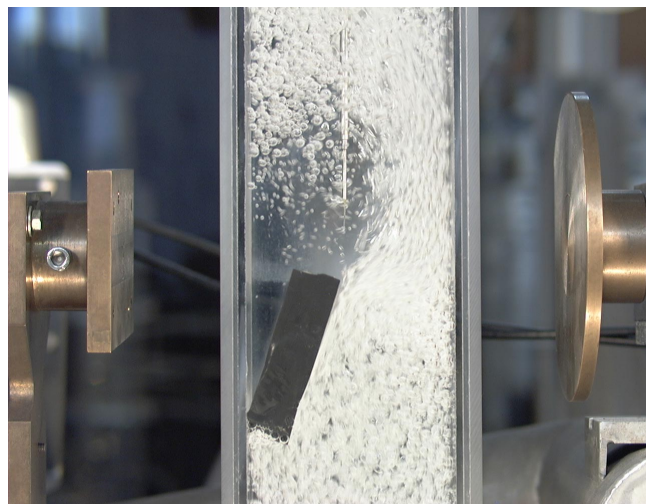


Sonde optique

Moyenne : 4,2 %
Incertitude absolue : ± 1 %

Débit d'air : 4 NI/min,
109 rotations sur 180°, 70 projections, image de 70 pixels de côté

Mesure d'écoulement dévié



CGLS Rég. masque

Moyenne : 9,1 %
Incertitude absolue : ± 8 %

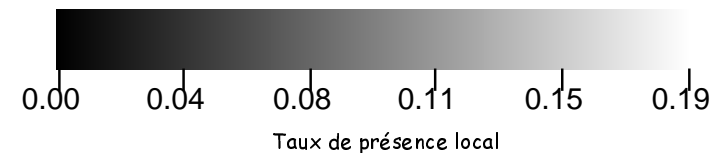
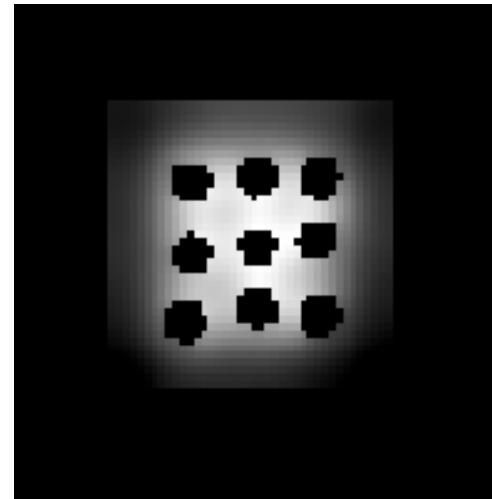
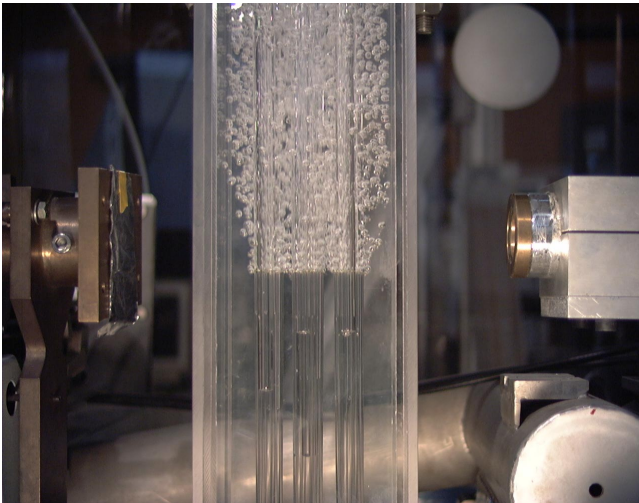
Sonde optique

Moyenne : 7,9 %
Incertitude absolue : ± 1 %

Débit d'air : 13 NI/min,
109 rotations sur 180°, 70 projections, image de 70 pixels de côté

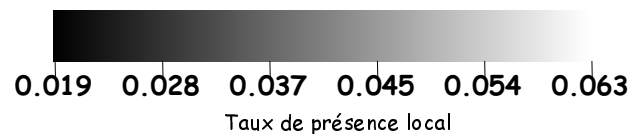
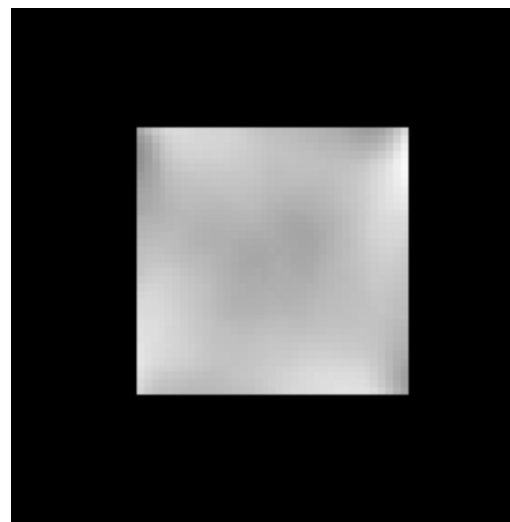
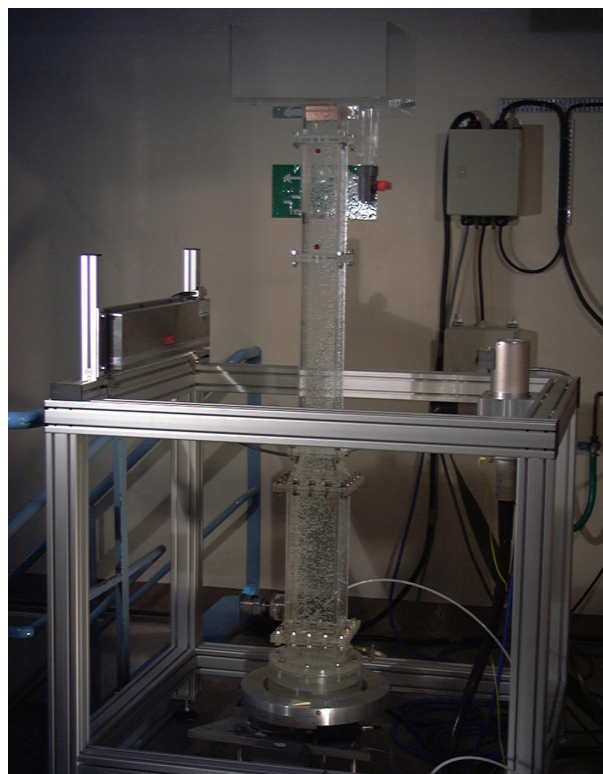
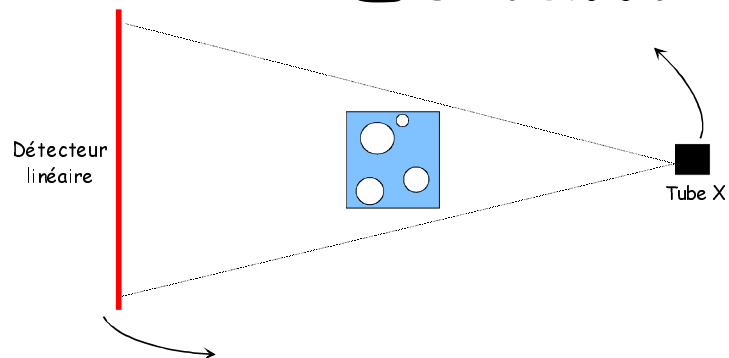
Mesure d'écoulement autour de faisceaux de tubes

Application



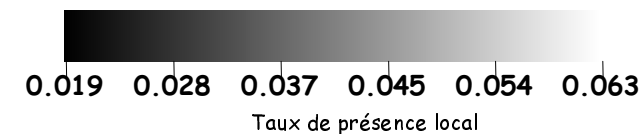
Débit d'air : 5 NI/min,
109 rotations sur 180°, 70 projections, image de 70 pixels de côté

Echantillonnage en éventail



CGLS Rég. masque

Moyenne : 4,6 %



Sonde optique

Moyenne : 4,2 %

Débit d'air : 4 NI/min,
189 rotations sur 360°, 60 pixels de détection, image de 70 pixels de côté

Plan de la présentation

- ♦ Contexte et objectif
- ♦ Dispositif expérimental
- ♦ Choix et optimisation de l'algorithme
- ♦ Application aux écoulements diphasiques
- ♦ Conclusions et perspectives

Conclusions

- ♦ Objectif de résolution atteint
- ♦ Différence entre la carte de taux de présence local tomographique et celle mesurée par sonde optique de l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure
- ♦ Développement de l'algorithme du masque
- ♦ Mise en œuvre d'un dispositif expérimental
- ♦ Développement d'une méthodologie de mesure
- ♦ Faisabilité de la mesure en faisceaux de tubes
- ♦ Mais incertitudes importantes (bruit, temps de réponse)
 - ⇒ Remplacement des détecteurs indispensable

Perspectives

- ♦ Choix du masque important, géométries circulaires imparfaitement décrites par des pixels carrés
 - ⇒ Utilisation d'un autre mailleur
 - ⇒ Calcul de l'interaction faisceau - pixel quelconque
- ♦ Prise en compte de l'épaisseur du faisceau de rayons X
- ♦ Nécessité de tests sur d'autres configurations d'écoulement
- ♦ Utilisation en échantillonnage en éventail :
 - ⇒ Optimisation des paramètres d'acquisition
 - ⇒ Prise en compte du durcissement du faisceau
- ♦ Mesures en trois dimensions
- ♦ 2 communications, 1 publication en préparation