

Techniques tomographiques : des outils de choix pour l'étude des réacteurs polyphasiques

D.Toye, E. Fransolet, A. Léonard,
M. Crine et P. Marchot
Laboratoire de Génie Chimique
Université de Liège – Sart-Tilman
B-4000 Liège - BELGIUM
www.chimapp.ulg.ac.be



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Techniques tomographiques

Étymologie :

Du grec *tomê* = section et *graphein* = décrire

Définition :

La tomographie consiste à reconstruire l'image d'une (de) section(s) droite(s) d'un objet à partir de mesures réalisées à la périphérie de l'objet (données de projections).

But :

Déterminer la nature et la distribution des composants présents dans la section de mesure en exploitant les différences de propriétés (contraste) existant entre eux.

Atouts :

- Techniques non intrusives;
- Information expérimentale "simultanée" relative à tous les "points" de la zone de mesure.



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Techniques tomographiques

Différentes **techniques tomographiques** qui correspondent à différentes **propriétés mesurées**

- Tomographies photoniques
Atténuation de radiations électromagnétiques (optique, rayons X et γ , émission de positrons, résonance magnétique)
- Tomographie acoustique
Propagation (réflexion, transmission) d'ultrasons
- Tomographies électriques
Mesure de signaux électriques (résistive, capacitive, inductive)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Techniques tomographiques

Différentes **techniques tomographiques** qui correspondent à différentes **résolutions spatiales et temporelles**

Technique tomographique	Résolution spatiale (\varnothing objet)	Résolution temporelle
Rayons X	0.1 %	1 min
Rayons γ	1 %	30 min
IRM	1 %	0.02 s
ERT	10%	0.01 s
ECT	10%	0.001 s



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Techniques tomographiques

Différentes **techniques tomographiques** qui correspondent à différentes **contraintes** et **limitations**

- Tomographie RX et R γ :
 - coût élevé
 - radiations ionisantes
- Tomographie IRM :
 - coût extrêmement élevé
 - matériaux non métalliques
- Tomographie à émission de positrons
 - particule marquée qui doit suivre l'écoulement
- Tomographie optique :
 - milieux transparents
- Tomographie à ultrasons :
 - complexe à mettre en oeuvre
- Tomographies électriques :
 - difficulté de reconstruction



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Techniques tomographiques

Différentes **techniques tomographiques** appliquées à différents types de **réacteurs polyphasiques**

- La tomographie à rayons γ :
 - colonnes à bulles (slurry);
 - réacteurs à lit fixe;
 - réacteurs à lits fluidisés ou à lits à jet.
- La tomographie à rayons X :
 - colonnes à bulles (slurry);
 - réacteurs à lit fixe;
 - réacteurs à lit fluidisé.
- La tomographie électrique résistive :
 - réacteurs à cuve agitée (slurry);
 - colonnes à bulles.
- La tomographie électrique capacitive :
 - réacteurs à lit fixe;
 - réacteurs à lit fluidisés.



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie à l'ULg

4 dispositifs de tomographie RX

2 « macro »

- 160 kV - 1 mm - Ø max objet : 0.60 m
- 420 kV - 0.1 mm - Ø max objet : 0.45 m

2 « micro »

- Skyscan 1074 : 40 kV - 40 µm - Ø max objet : 0.02 m
- Skyscan 1172 : 100kV - 5 µm - Ø max objet : 0.07 m

2 dispositifs de tomographie électrique :

ERT - 2 plans - 16 électrodes - 5 cm - Ø objet : 0.25 m, 10 Hz

ECT - 1 plan - 12 électrodes - 5 cm - Ø objet : 0.30 m, 25 Hz



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Halle expérimentale de Chimie appliquée



- Situation : Sart Tilman, Liège (Campus Universitaire)
- Superficie : 900 m² (30 m x 30 m)
- Hauteur disponible : 6 m
- Fluides techniques : eau, air comprimé, gaz naturel
- Laboratoire d'analyses chimiques
- Salle de réunion



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie à rayons X

- Principe de la méthode et reconstruction des images
- Dispositifs expérimentaux
- Résultats obtenus sur des systèmes polyphasiques

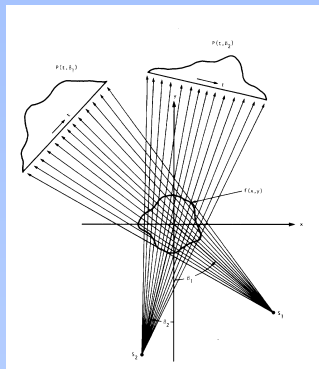


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Principe de la tomographie RX

Projections Mesure de l'intensité du rayonnement transmis dans un grand nombre de positions angulaires



Images : Cartes 2D des coefficients d'atténuation linéaire reconstruites à partir des données de projection



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie à rayons X

Reconstruction des images

μ = coefficient d'atténuation linéaire des rayons X

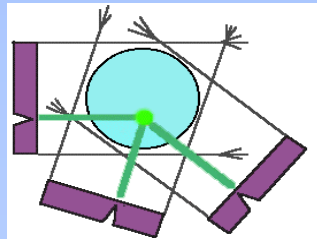
$$\mu = \rho \left(a + \frac{bZ^{3.8}}{E^{3.2}} \right)$$

ρ = densité

Z = nombre atomique

E = énergie des rayons X

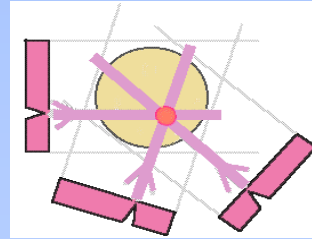
Projection



$$I(x, y) = I_0 \exp \left[- \int \mu(x, y, z) dz \right]$$

Projection = Intégrale de ligne

Rétro-projection linéaire



$$\mu(x, y) = \int q_{\theta}(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta$$

Image = 'carte 2D de μ '



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006

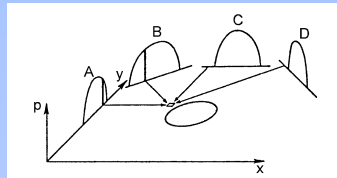


Rétro-projection filtrée

Filtrage des projections dans le domaine de Fourier avant rétro-projection

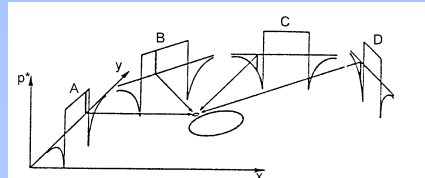
Filtre rampe

Annulation des pixels situés à l'extérieur de l'objet



Sans filtre rampe

Valeur non nulle du pixel extérieur



Avec filtre rampe

Pixel extérieur nul

Filtre de Hamming

Amélioration de l'image reconstruite (diminution du bruit)



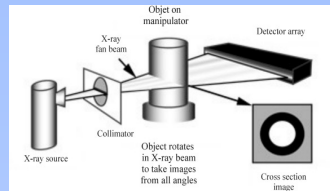
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie à rayons X

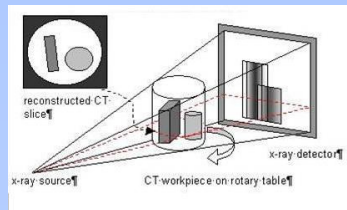
Géométrie du faisceau incident

- Faisceau en éventail (fan beam)



- Source RX ponctuelle
- Détecteur 1D (photodiodes)
- Mesures dans une seule section
- Reconstruction directe

- Faisceau conique (cone beam)



- Source RX ponctuelle
- Détecteur 2D (caméra CCD)
- Mesures simultanées sur toutes les sections droites de l'objet
- Nécessité de corriger les erreurs de parallaxe avant reconstruction



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Dispositifs de tomographie RX

Deux caractéristiques essentielles et interdépendantes

Énergie de la source RX

- ↳ densité maximum du matériau analysé
- ↳ diamètre maximum de l'objet

Résolution – limite de détection

- ↳ taille des éléments sensibles du détecteur (« pitch » du détecteur)
- ↳ tache focale de la source RX
- ↳ géométrie du manipulateur (facteur de « magnification »)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

Année
d'acquisition
1993

SOURCE RX
Tension : 10 - 160 kV
Courant : 1 - 4 mA
Tache focale : 0.4 mm
Collimateur : laiton
Angle : 40° - Ép. : 1 mm

COLONNE
(PE ou PMMA)
sur plateau fixe

Diamètre :
0.3 - 0.45 - 0.6 m
Hauteur : 2 m

DÉTECTEUR LINÉAIRE
1024 photodiodes
Pas : 1.6 mm
8-bit

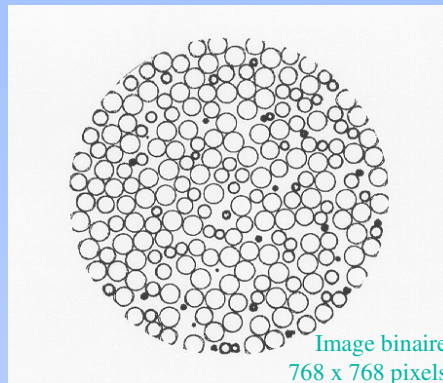
Fluides :

MANIPULATEUR
Rotation source-détecteur
 $f_{mes} = 2.5$ min/section



Tomographe RX 160 kV

Résultats expérimentaux



Colonne 0.6 m diam.
Empilage aléatoire de **balles de ping pong**
(parois 0.4 mm)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

Empilage aléatoire

Colonne en PMMA – diamètre : 0.3 m – hauteur : 2 m

Empilage aléatoire de CMR#1A (Glitsch)

Matériau : PP
Dimension nominale : 0.0254 m (1 in)
Surface spécifique : 185 m²/m³
Fraction de vide : 92%
Application : colonnes d'absorption



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

CMR#1A irrigué - Images du solide

1. Mesure des projections sur l'empilage sec : *proj_sec*
2. Reconstruction de la distribution du solide à partir de *proj_sec*

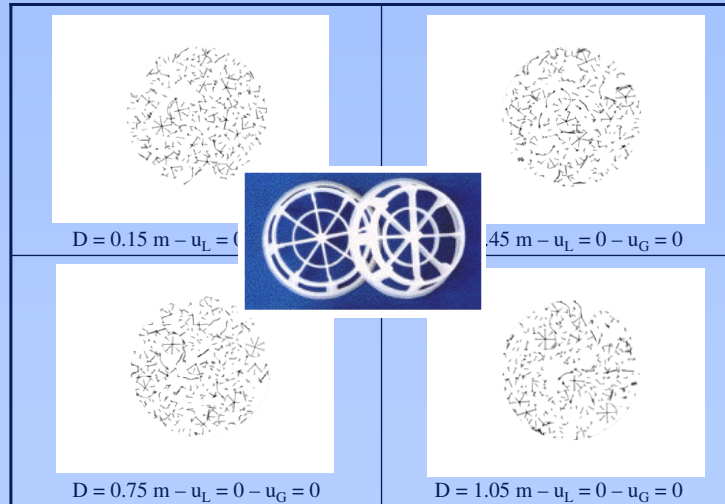


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

CMR#1A non irrigué – Images du solide



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

CMR#1A irrigué – Images du solide et du liquide

1. Mesure des projections sur l'empilage sec : *proj_sec*
2. Reconstruction de la distribution du solide à partir de *proj_sec*
3. Mesure des projections sur l'empilage irrigué : *proj_irr*
4. Calcul de la contribution du liquide :
$$proj_{liq} = proj_{irr} - proj_{sec}$$
5. Reconstruction de la distribution du liquide à partir de *proj_liq*
6. Superposition des images binaires du solide (gris) et du liquide (bleu)

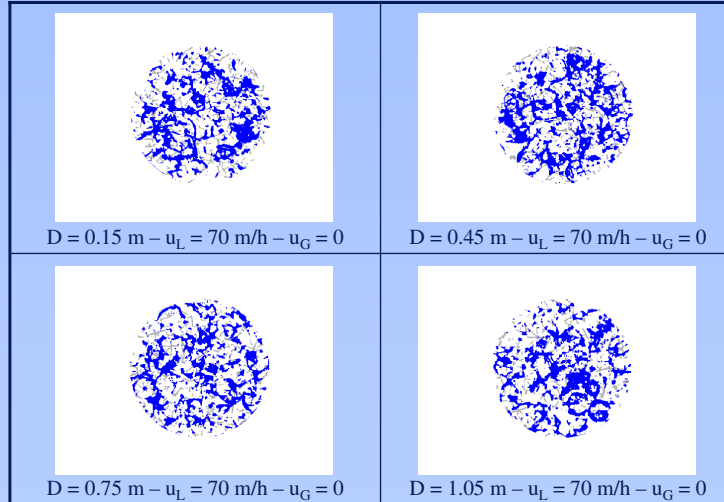


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

CMR#1A irrigué – Images du solide et du liquide



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

Empilage structuré

Colonne en PE – diamètre : 0.6 m – hauteur : 1.5 m

4 éléments de Mellapak 250Y (Sulzer)

Matériau :	PP
Surface spécifique :	$250 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Fraction de vide :	87.5 %
Éléments :	diamètre : 0.6 m hauteur : 0.31 m
Ondulations :	base : 24 mm hauteur : 13 mm angle : 45°
Application :	colonnes d'absorption

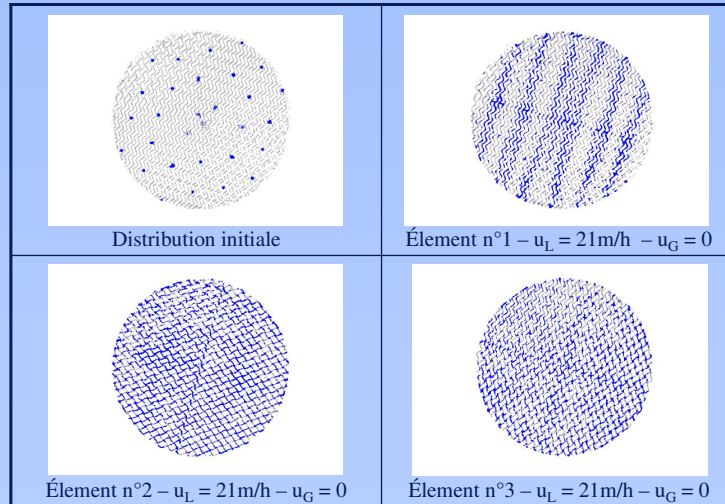


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

Mellapak 250Y irrigué – Images du solide et du liquide



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

Calcul des valeurs de rétention (liquide et solide)

Élimination du bruit

- Seuillage des images de manière à éliminer 90% du bruit (évalué sur les pixels extérieurs à l'image);
- Application d'un masque circulaire qui élimine l'image de la paroi et annule les pixels extérieurs à la colonne.

Rétention solide (fraction de vide)

- Normation des pixels de l'image en niveaux de gris de la distribution du solide par un pixel entièrement rempli de solide (maximum des images).

Rétention liquide

- Normation des pixels de l'image en niveaux de gris de la distribution du liquide par un pixel entièrement rempli de liquide (évalué sur des échantillons témoins).

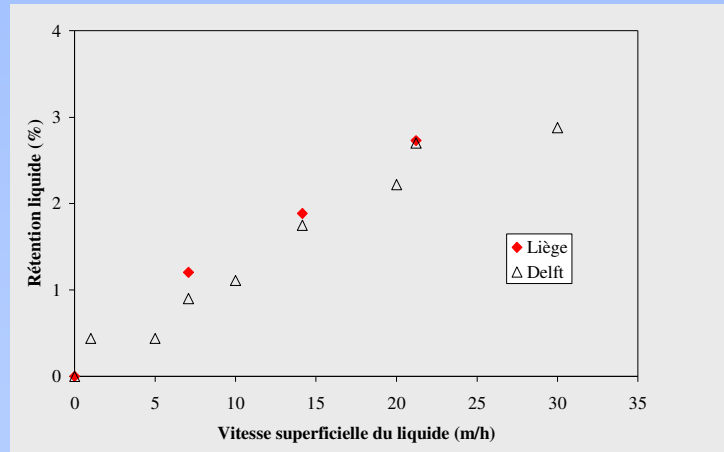


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

Mellapak 250Y irrigué – Rétention de liquide ($u_G=0$)



Comparaison TU Delft (mesure globale) – ULG (mesure tomo)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006

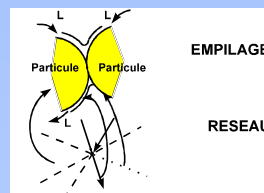


Tomographe RX 160 kV

Validation d'un modèle d'écoulement

= Modèle **discret** basé sur une **approche probabiliste**

Empilage = réseau 3D régulier composé de sites et de liaisons



Distribution du liquide = processus aléatoire résultant des propriétés d'accessibilité (aléatoires) attribuées aux différentes liaisons du réseau :

ϵ_s = accessibilité statique (géométrie)

ϵ_d = accessibilité dynamique (débit minimum)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

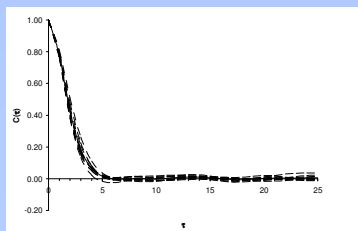
Modèle d'écoulement \Rightarrow distribution des débits locaux
(modèle de mouillage partiel)

Distribution calculée sur les images, à l'échelle de la cellule élémentaire, grâce à une **équation d'Ergun** modifiée (écoulement gaz-liquide) et approximée par une loi de puissance

$$h_{L,i} = C^{1/3} Ga_L^{-1/3} Re_{L,i}^{\frac{n+1}{3}}$$

Définition de la **cellule élémentaire**

Annulation de la fonction d'auto-corrélation calculée sur les images d'empilage sec (6-7 pixels - 10-12 mm)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 160 kV

Modèle d'écoulement : distribution des débits locaux

Pour $u_{L,i} > u_{L,min}$

$$p(u_{L,i}) = (1 - f_w) f_w^{u_{L,i}/u_{L,min}}$$

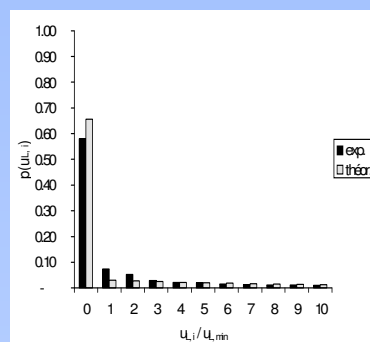
Pour $u_{L,i} = 0$

$$p(u_{L,i}) = (1 - \varepsilon_s) + (1 - f_w) f_w^{u_{L,i}/u_{L,min}}$$

avec

$$f_w = \frac{u_L}{u_L + \varepsilon_s u_{L,min}}$$

(fraction irriguée)



CMR#1A

$$\varepsilon_s = 0.40 - u_{L,min} = 2.10^{-3} \text{ m/s}$$



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

Année
d'acquisition
2005

SOURCE RX
Tension : 30 - 420 kV
Courant : 2 - 8 mA
Tache focale : 0.8 mm
Collimateur : Pb
Angle : 40° - Ep. : 1 mm

CHARCOT
Mouvement vertical
Source RX - Détecteur

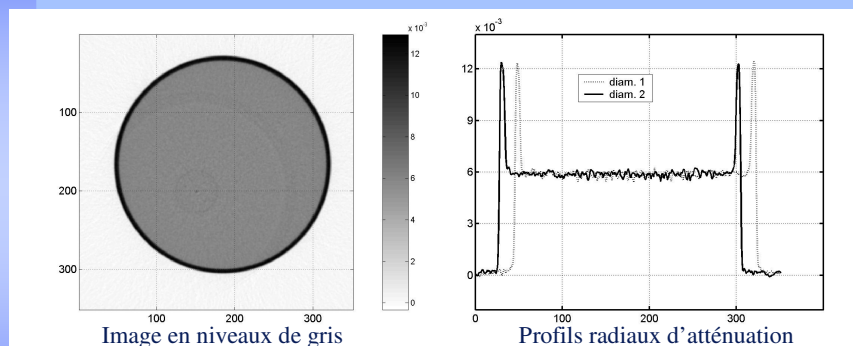
DÉTECTEUR LINÉAIRE
1280 photodiodes
Pas : 0.4 mm - H : 0.6 mm

PLATEAU TOURNANT
Rotation de l'objet ($t_{mes} = 45$ s)
Diam. max. : 0.45 m
Hteur max. : 3.80 m



Tomographe RX 420 kV

Résultats expérimentaux



Récipient cylindrique en verre de 10 cm de diamètre
rempli d'eau



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

Empilage aléatoire

Colonne en PMMA – diamètre : 0.3 m – hauteur : 2 m

Empilage aléatoire de PALL Ring 25

Matériau : PP
Dimension nominale : 0.025 m
Surface spécifique : $220 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Fraction de vide : 91 %
Application : colonnes d'absorption

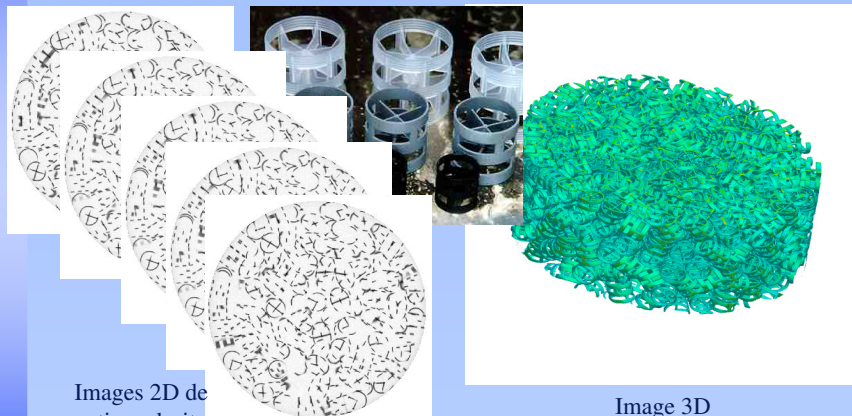


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

PALL Ring 25 non irrigué – Images du solide



Images 2D de sections droites
Pixels : $0.4 \times 0.4 \text{ mm}^2$
Pas vertical : 0.5 mm

Image 3D
= empilement de 250 images 2D
(voxel : $0.4 \times 0.4 \times 0.5 \text{ mm}^3$)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

Empilage de distillation réactive

Colonne en PMMA – diamètre : 0.1 m – hauteur : 1 m

5 éléments de KATAPAK SP12 (Sulzer Chemtech)

Éléments d'empilage : hauteur : 0.20 m
diamètre : 0.09 m

Rapport du nbre de sections
de réaction et du nbre de
sections de séparation

1:2

Fraction de vide

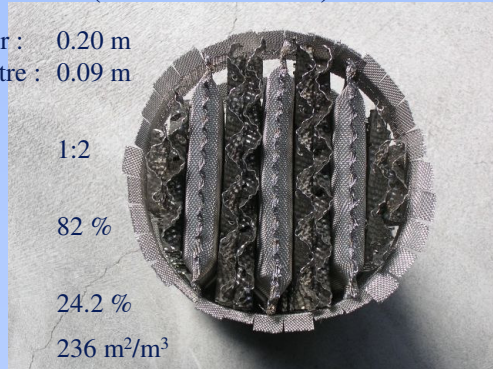
82 %

Fraction de volume
occupée par le catalyseur

24.2 %

Surface spécifique

236 m²/m³

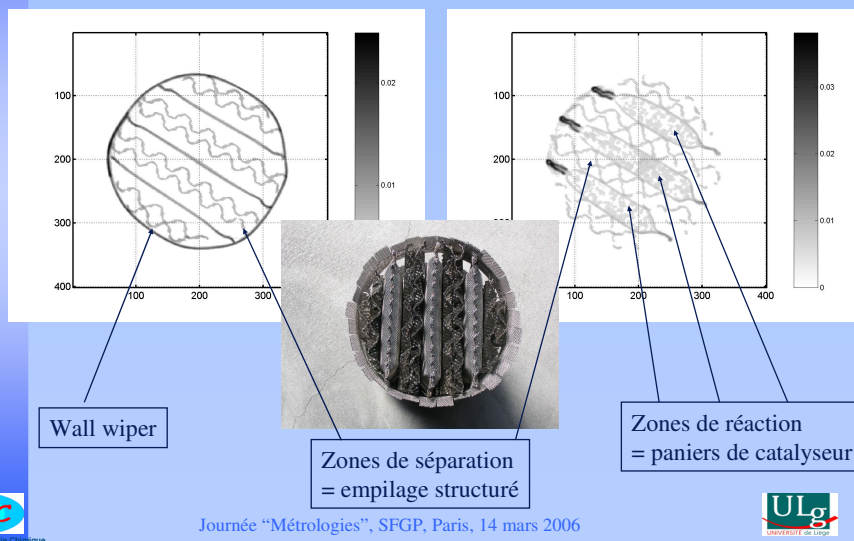


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

KATAPAK SP 12 non irrigué



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

KATAPAK SP 12 irrigué

Images de la distribution du solide et du liquide

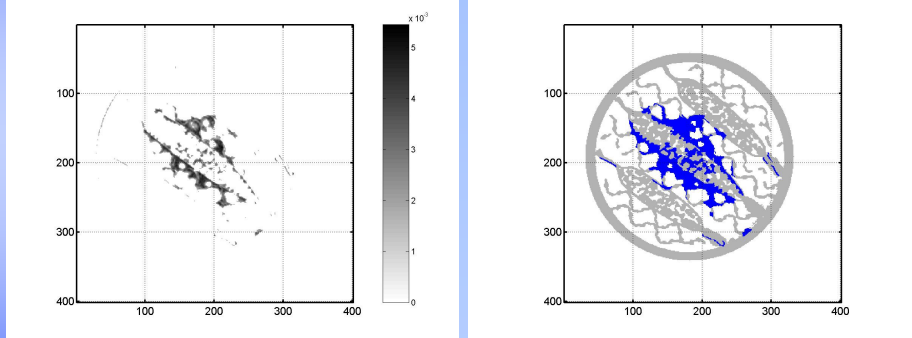


Image en niveaux de gris
Distribution du liquide

Images binaires superposées :
- distribution du solide (gris)
- distribution du liquide (bleu)



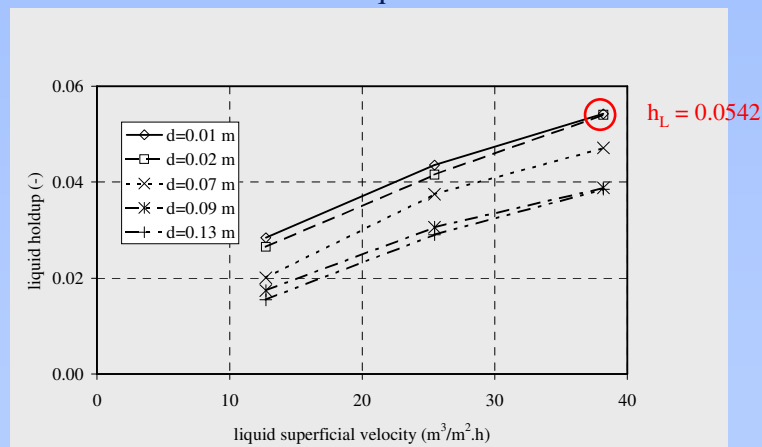
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

KATAPAK SP 12 irrigué

Évolution de la rétention de liquide



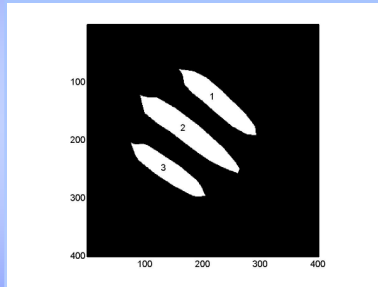
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographe RX 420 kV

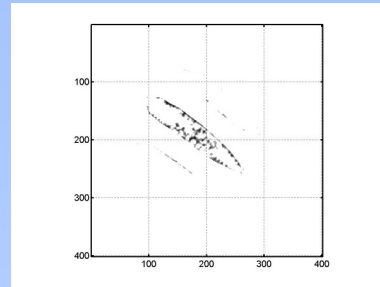
KATAPAK SP 12 irrigué

Distribution du liquide entre les zones de réaction et de séparation



Distribution de la surface

- Zones de séparation : 73.2 %
- Zones de réaction :
 - panier 2 : 11.3 %
 - paniers 1 + 3 : 15.5 %



Distribution de la rétention liquide

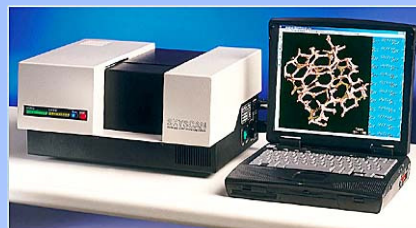
- Zones de séparation : 75.8 %
- Zones de réaction :
 - panier 2 : 23.3 %
 - paniers 1 + 3 : 0.1 %



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Microtomographe à rayons X



Année d'acquisition :
2000

Skyscan-1074 X-ray scanner

- Source : 40 kV - 1 mA - Cone beam
- Détecteur : 768 x 576 pixels
Caméra CCD 8-bit
- Résolution spatiale : 41 μm
- Taille max. objet : \varnothing : 30 mm – h : 25 mm

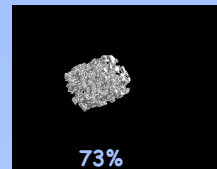
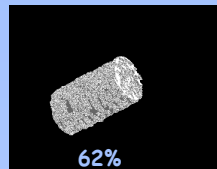
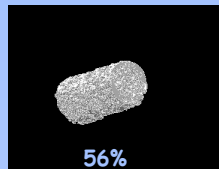


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006

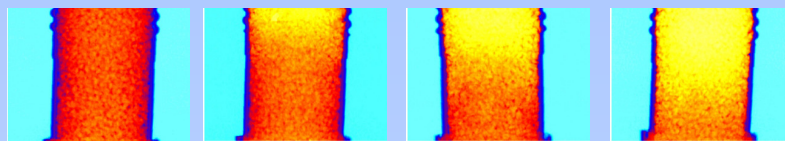


Microtomographe à rayons X

Applications



Imprégnation d'un catalyseur xérogel Pd-Ag/SiO₂ sur une mousse d'alumine



Etat initial

3 min

6 min

9 min

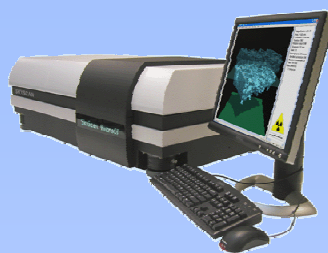
Adsorption de CCl₄ sur un lit de charbon actif



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Microtomographe à rayons X



Date d'acquisition :
03 mars 2006

Skyscan-1172 X-ray scanner

- Source : 100 kV - 250 μ A - Cone beam
- Détecteur : 4000 x 2300 pixels
Caméra CCD 12-bit
- Résolution spatiale : 5 μ m
- Taille max. objet : \varnothing : 30 mm – h : 25 mm



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie RX

Conclusions

La tomographie RX :

- est relativement **difficile** à mettre en œuvre et à utiliser;
- permet d'obtenir des **images 2D et 3D** de la distribution des phases solide et liquide dans un lit fixe;
- rend compte **quantitativement** de l'évolution de la valeur globale et de la distribution spatiale de la rétention liquide avec le débit de liquide;
- permet de détecter des maldistributions qui apparaissent à **toutes les échelles** (échelle locale => échelle colonne);
- a une résolution temporelle qui limite son utilisation à l'étude de procédés stationnaires.



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique

Tomographie électrique résistive

Reconstruire la carte de conductivité $\sigma(x,y)$ dans une section droite d'un objet à partir de mesures de différences de potentiel entre des électrodes, fixées sur la périphérie de l'objet, induites par l'injection de courant entre deux électrodes.

Applicable à des milieux globalement conducteurs (phase non conductrice dispersée)

Tomographie électrique capacitive

Reconstruire la carte de constante diélectrique $\epsilon(x,y)$ dans une section droite d'un objet à partir de mesures de capacité entre des électrodes, fixées sur la périphérie de l'objet, induites par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes.

Applicable à des milieux globalement non conducteurs (phase conductrice dispersée)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique

Tomographie électrique résistive

Reconstruire la carte de conductivité $\sigma(x,y)$ dans une section droite d'un objet à partir de mesures de différences de potentiel entre des électrodes, fixées sur la périphérie de l'objet, induites par l'injection de courant entre deux électrodes.

Applicable à des milieux globalement conducteurs (phase non conductrice dispersée)

Tomographie électrique capacitive

Reconstruire la carte de constante diélectrique $\epsilon(x,y)$ dans une section droite d'un objet à partir de mesures de capacité entre des électrodes, fixées sur la périphérie de l'objet, induites par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes.

Applicable à des milieux globalement non conducteurs (phase conductrice dispersée)



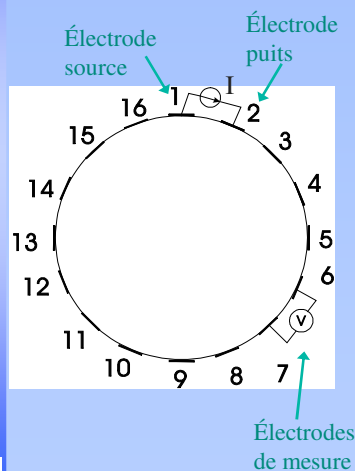
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Principe de la méthode

Stratégie des électrodes adjacentes



Equation de Poisson

$$\nabla \cdot (\sigma(x, y) \nabla \phi) = 0$$

A l'électrode source

$$\int_{\Gamma_1} \sigma \frac{\partial V}{\partial n} ds = I$$

A l'électrode puits :

$$\int_{\Gamma_2} \sigma \frac{\partial V}{\partial n} ds = -I$$

Aux autres frontières :

$$\left. \frac{\partial V}{\partial n} \right|_{\Gamma_d} = 0 \quad \text{et} \quad V_{\Gamma_{ic}} = cste$$



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

104 mesures de ΔV
(16 électrodes)



Reconstruction
(rétroprojection
linéaire)

$$p(i, j) = \sum_{k=1}^{104} a(i, j, k) \frac{V_{mes}(k)}{V_{réf}(k)}$$

pixel

matrice
de
sensibilité

ΔV normé

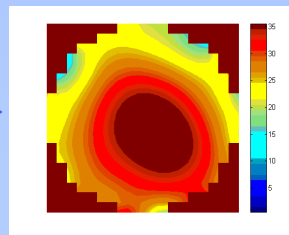
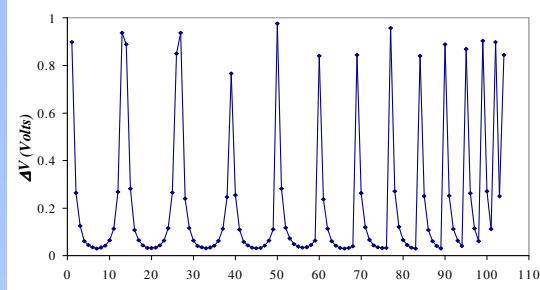


Image 20 x 20 pixels



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Dispositif expérimental

Colonne à bulles

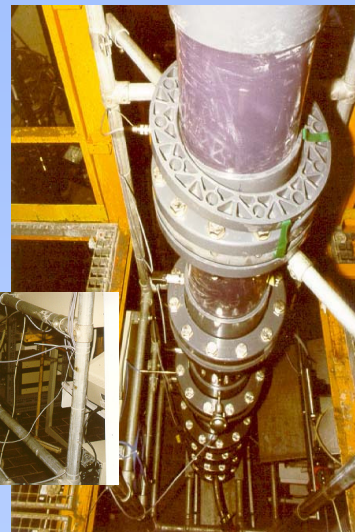
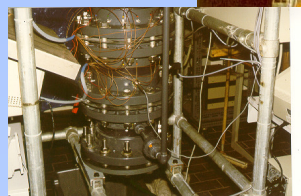
diamètre : 0.24 m

hauteur : 5 m

$u_G = 0 - 0.15$ m/s (air)

$u_L = 0$ (eau)

Tomographe électrique résistif (ERT) (ITS prototype 2000)



2 plans de mesure

16 électrodes inox (2.4 cm x 2.4 cm)

$t_{mes} = 0.1$ sec/image



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



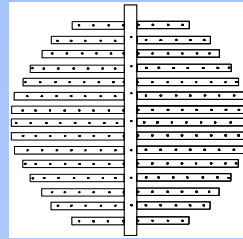
Tomographie électrique résistive

Distribution de la rétention gazeuse

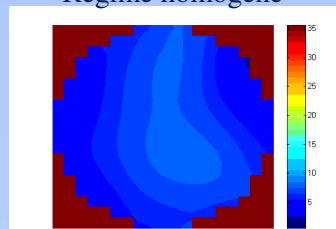
Influence du régime d'écoulement

Distribution initiale uniforme

203 trous de 1 mm
4511 trous/m²
surface libre 0.35%

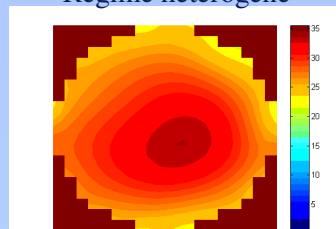


Régime homogène



$u_G = 0.02$ m/s

Régime hétérogène



$u_G = 0.11$ m/s



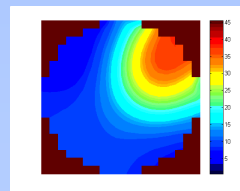
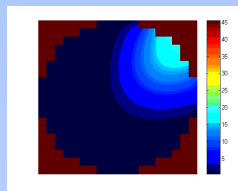
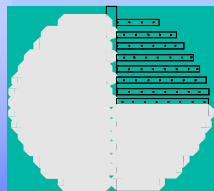
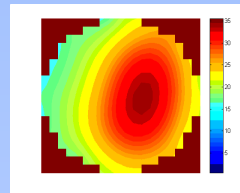
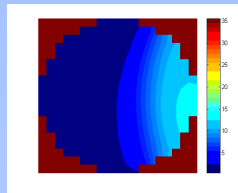
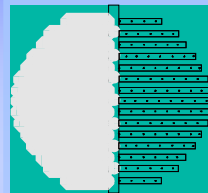
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Distribution de la rétention gazeuse

Influence de la distribution initiale



$u_G = 0.02$ m/s

$u_G = 0.11$ m/s



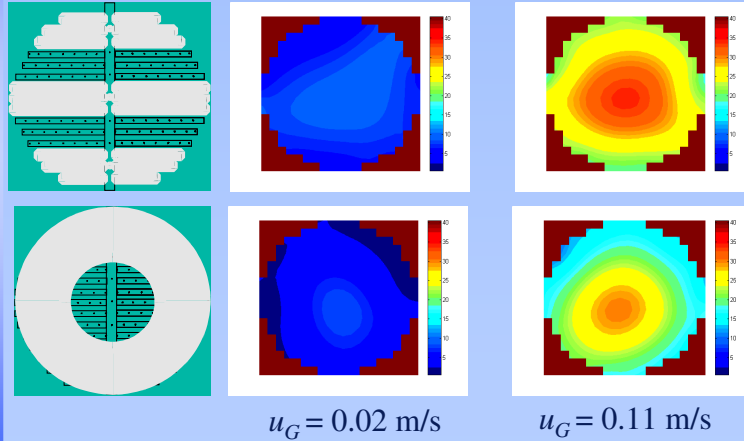
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Distribution de la rétention gazeuse

Influence de la distribution initiale



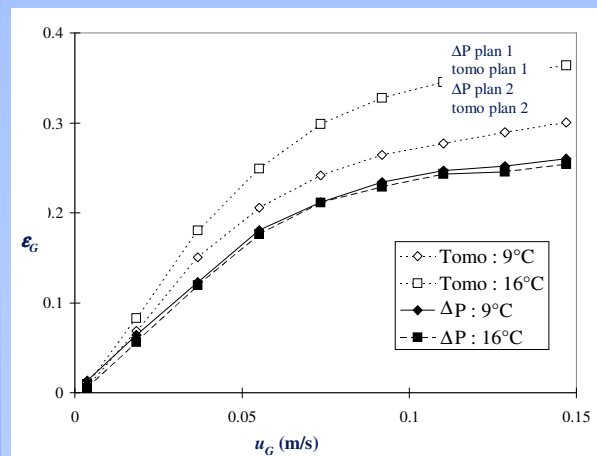
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Mesure de la rétention gazeuse globale

Comparaison avec mesures par ΔP



Mesures de rétention gazeuse par ERT sensibles à la température ($\sigma = \text{fct}(T)$)

Résultats **non** quantitatifs



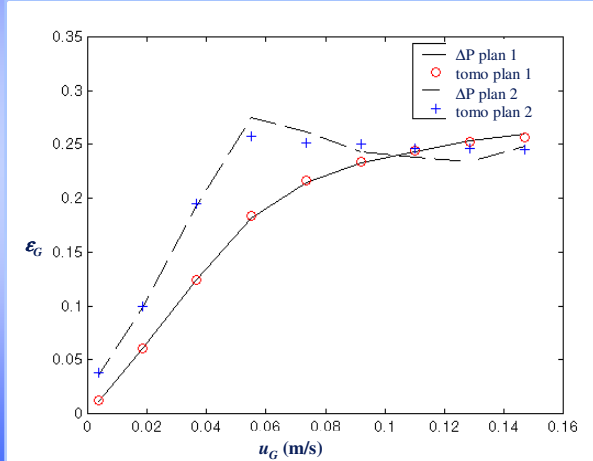
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Mesure de la rétention gazeuse globale

Comparaison avec mesures par ΔP



Utilisation d'un **réseau de neurones** appliqué aux valeurs de ΔV_{mes} et tenant compte de la relation ($\sigma = fct(T)$)



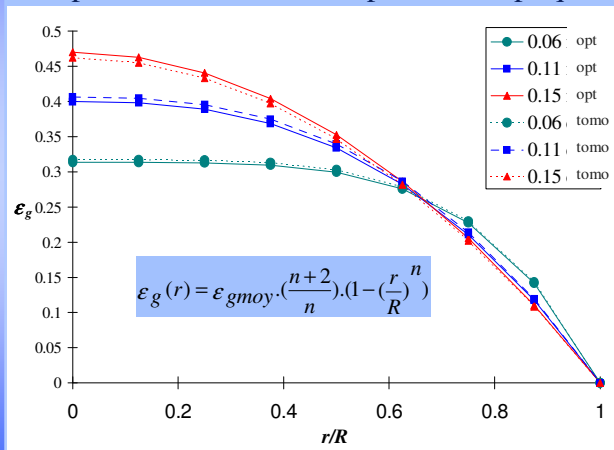
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Mesure du profil radial de rétention gazeuse

Comparaison avec mesures par sonde optique



Utilisation d'un **réseau de neurones** appliqué aux valeurs de ΔV_{mes} pour calculer l'exposant n



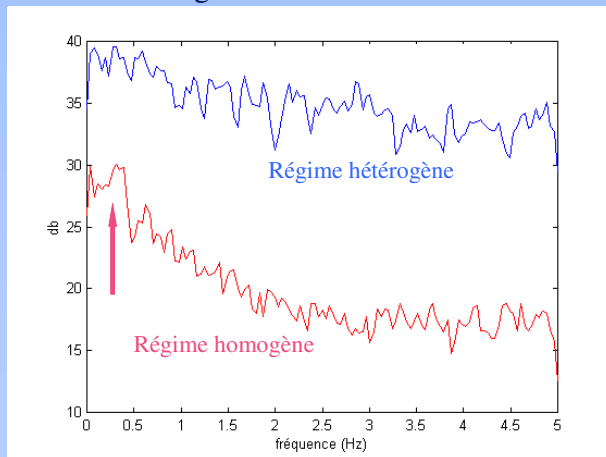
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Analyse du contenu fréquentiel

Détection du régime d'écoulement



$f_{acq} = 10 \text{ Hz}$

Méthode de Welch

Pas de pic en régime hétérogène

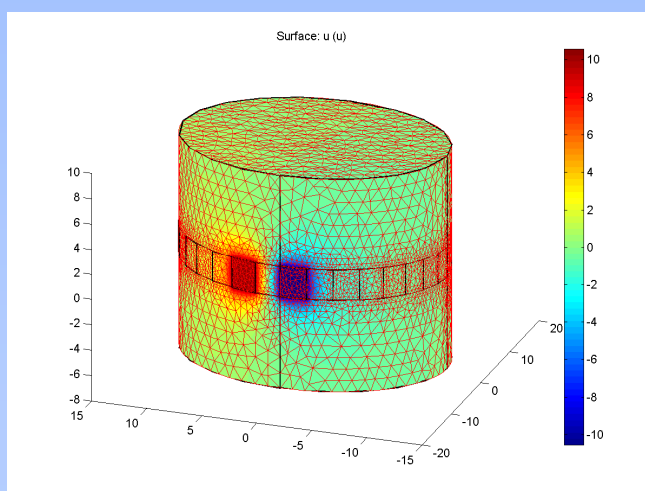


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Simulations FEM en 3D



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique résistive

Conclusions

La tomographie électrique résistive :

- est relativement facile à mettre en œuvre et à utiliser;
- permet d'obtenir des **images** de la distribution de la rétention gazeuse dans une section droite;
- rend compte **qualitativement de l'évolution** avec le débit d'air de la valeur globale et du profil radial de rétention gazeuse;
- permet de **détecter des maldistributions** qui apparaissent à grande échelle ($> \frac{1}{4} \varnothing$ colonne);
- ne permet pas (par analyse du contenu fréquentiel) de détecter le **régime hydrodynamique** en présence.



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique

Tomographie à partir de mesures de différences de potentiel entre électrodes fixées sur la périphérie de l'objet, induites par l'injection de courant entre deux électrodes.

Applicable à des milieux globalement conducteurs (phase non conductrice dispersée)

Tomographie électrique capacitive

Reconstruire la carte de constante diélectrique $\epsilon(x,y)$ dans une section droite d'un objet à partir de mesures de capacité entre des électrodes, fixées sur la périphérie de l'objet, induites par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes.

Applicable à des milieux globalement non conducteurs (phase conductrice dispersée)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Principe de la méthode

Électrodes (12) réparties à la périphérie de l'objet

Excitation en potentiel d'une électrode source U_{ij}
 \Rightarrow charges Q_{ij} induites sur les autres électrodes
 maintenues à un potentiel nul

Mesure de la capacité C_{ij} entre l'électrode source et les électrodes de mesure

Equations de Maxwell

$$\vec{E} = -\nabla\phi$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

Pas de charge dans le milieu

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot (\epsilon(x, y) \nabla \phi) = 0$$

Charge induite sur l'électrode j par l'électrode i

$$Q_{ij} = \oint \epsilon \vec{E} \cdot \vec{n} \, dl$$

$$C_{ij} = \frac{Q_{ij}}{U_{ij}} \quad \text{et} \quad \left. \frac{\partial V}{\partial n} \right|_{\Gamma_d} = 0$$



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

66 mesures de C_{ij}
 (12 électrodes)

Normation

$$C_{ij}(NORM) = \frac{C_{ij}(MEAS) - C_{ij}(LOW)}{C_{ij}(HIGH) - C_{ij}(LOW)}$$

Reconstruction
 (rétroprojection linéaire)

$$\epsilon_{NORM} = S^T C_{NORM}$$

Matrice de sensibilité

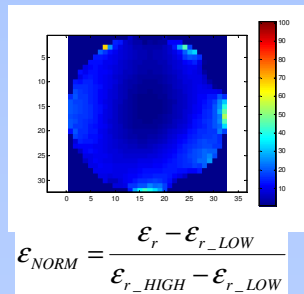
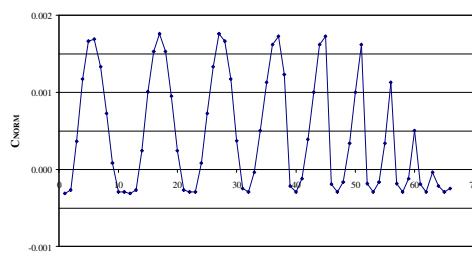


Image
 32 x 32
 pixels

$$\epsilon_{NORM} = \frac{\epsilon_r - \epsilon_{r_LOW}}{\epsilon_{r_HIGH} - \epsilon_{r_LOW}}$$

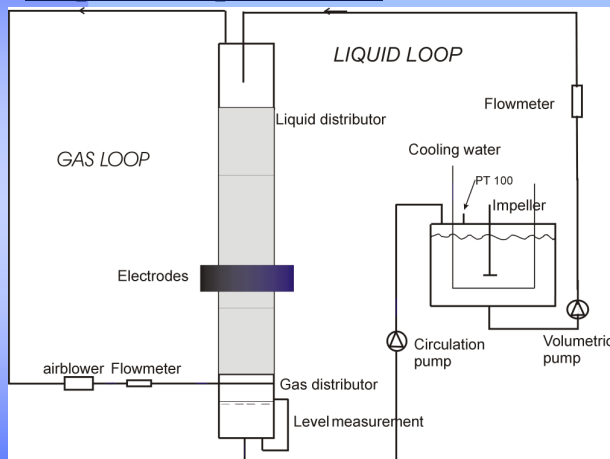


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Dispositif expérimental



Colonne à empilage

diamètre : 0.30 m
 hauteur : 2.30 m
 $u_G = 0 - 0.8 \text{ Nm}^3/\text{m}^2.\text{s}$
 $u_L = 0 - 142 \text{ m/h}$

Tomographe électrique capacitif (ECT) (PTL300)

1 plan de mesure
 12 électrodes en Cu
 $f_{mes} = 25 \text{ Hz}$

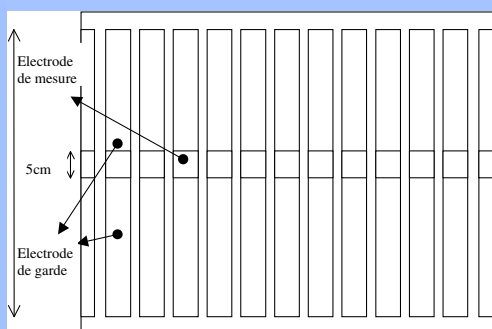


Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Schéma des électrodes



Hauteur des électrodes de mesure (12) : 50 mm
 Hauteur des électrodes de garde (2 X 12) : 125 mm
 Largeur des électrodes de mesure (12) : 75 mm
 Largeur des électrodes intercalaires (12) : 3 mm
 Largeur des zones isolantes (24) : 1 mm



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Distribution de la rétention liquide

Distribution uniforme **Liquide (eau)**

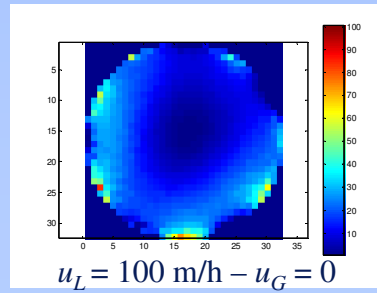
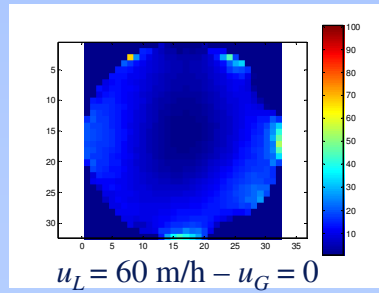
9 trous (\varnothing : 60 mm) : 100 trous/m²

6 cheminées (\varnothing : 60 mm – h : 200mm)

Gaz (air)

Tube horizontal (\varnothing : 81 mm)

6 orifices (\varnothing : 25 mm) vers le bas



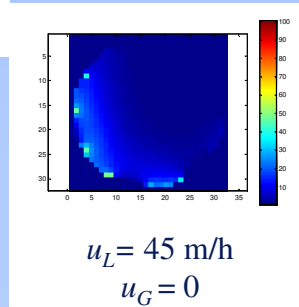
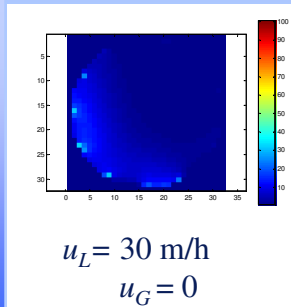
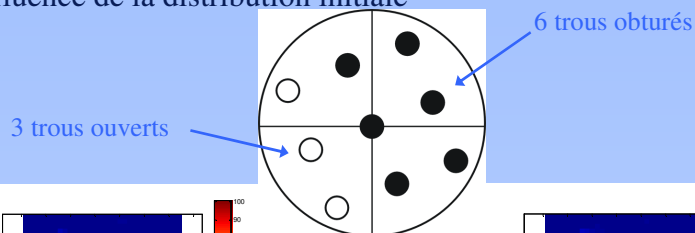
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Distribution de la rétention liquide

Influence de la distribution initiale



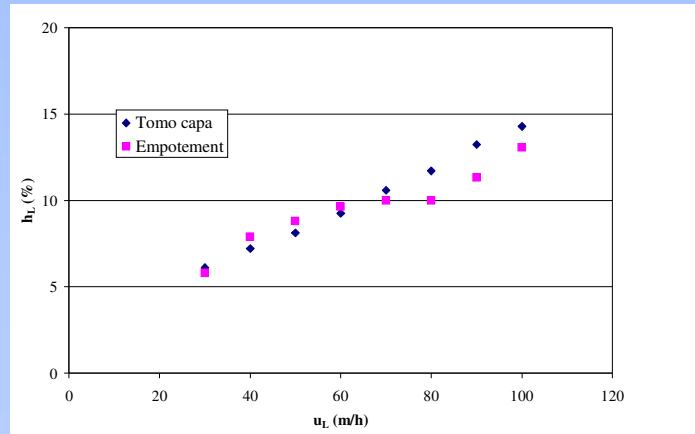
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Mesure de la rétention liquide globale

Comparaison avec mesures par empotement
(distribution initiale uniforme – $u_G = 0$)



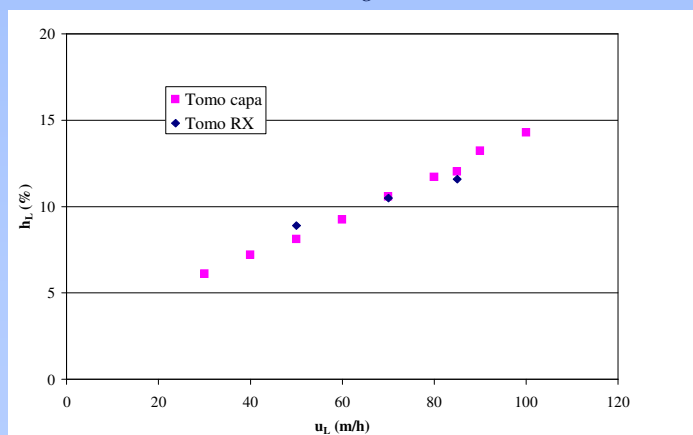
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Mesure de la rétention liquide globale

Comparaison avec mesures par tomographie RX
(distribution initiale uniforme – $u_G = 0$)



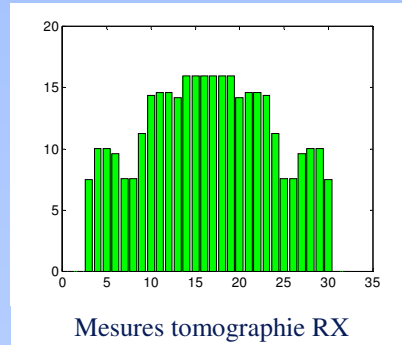
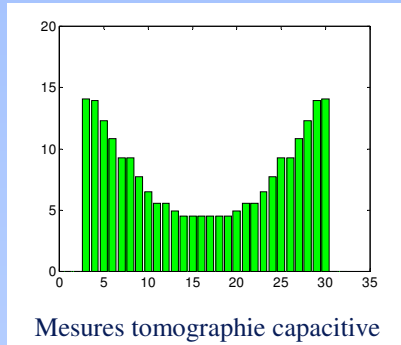
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Mesure du profil radial de rétention liquide

Comparaison avec mesures par tomographie RX
(distribution initiale uniforme – $u_L = 70 \text{ m/h} - u_G = 0$)



« Détecte » un écoulement à la paroi non existant



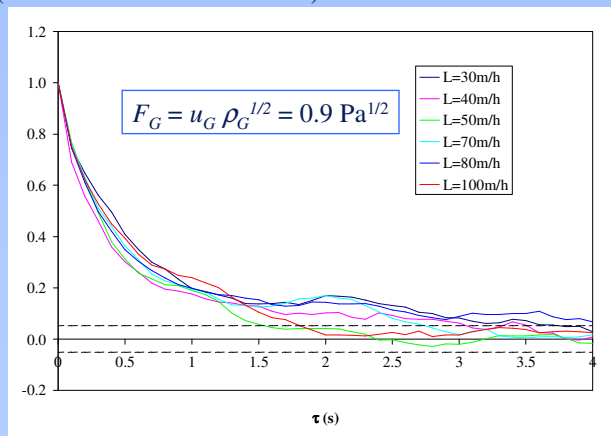
Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Analyse du contenu temporel

Calcul des fonctions d'auto-corrélation (rétention liquide)
(distribution initiale uniforme)



$f_{acq} = 25 \text{ Hz}$

Pas d'influence des débits de gaz et de liquide (< point de charge)



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Tomographie électrique capacitive

Conclusions

La tomographie électrique capacitive :

- est relativement facile à mettre en œuvre et à utiliser
- permet d'obtenir des **images** de la distribution de la rétention liquide dans une section droite;
- rend compte **quantitativement de l'évolution** de la rétention globale de liquide avec le débit de liquide
- permet de **détecter des maldistributions** qui apparaissent à grande échelle ($> \frac{1}{4} \varnothing$ colonne)
- ne permet pas de mesurer le **profil radial** de rétention liquide

Le **contenu temporel** des signaux n'apporte pas d'information exploitable dans la gamme de conditions opératoires explorée.



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006



Conclusions générales

- Les **techniques tomographiques** sont des techniques **non intrusives** qui permettent d'accéder à la **rétention des différentes phases** : valeurs globales et distributions spatiales;
- Les **modèles de performance** se basent sur des **distributions de vitesses locales**
=> emploi de techniques de mesure intrusives ou de modèles locaux (non intrusifs);
- Les caractéristiques de la **tomographie RX** (difficulté de mise en œuvre, excellente résolution spatiale, résultats quantitatifs) en font un outil de choix pour le **développement et la validation de modèles d'écoulement** => **instrument scientifique**;
- Les caractéristiques des **tomographies électriques** (facilité de mise en œuvre, faible résolution spatiale, résultats qualitatifs) en font un outil de choix pour le **suivi de procédés** => **instrument de contrôle et de diagnostic**.



Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006





Journée "Métrologies", SFGP, Paris, 14 mars 2006

