

Approche problèmes inverses pour le traitement d'hogrammes de particules

J. Gire^{1,2} C. Ducottet¹ C. Fournier¹ E. Thiébaud² F. Soulez^{1,2}

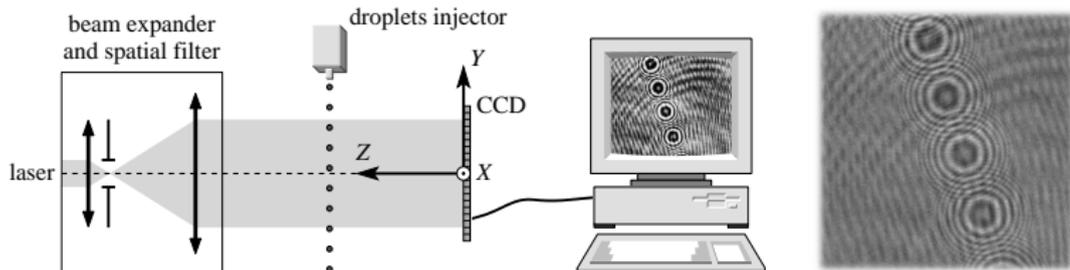
¹Laboratoire Hubert Curien (ex LTSI)
St Etienne

²Centre de Recherche Astronomique de Lyon
Université Claude Bernard Lyon I
Ecole Normale Supérieure de Lyon

Peyresq 2009
20 - 26 Juillet 2009

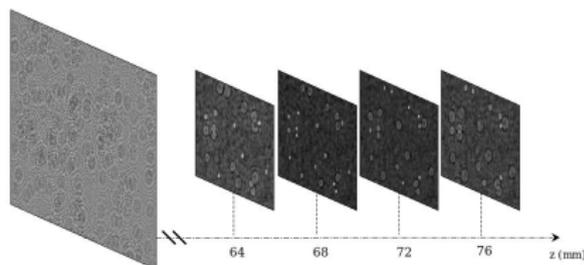
Introduction

- Holographie numérique de micro-objets
 - Montage en ligne de Gabor
 - Enregistrement direct sur le capteur de la caméra
 - Enregistrement d'une information 3D en une seule acquisition.
- Dépouillement numérique :
 - Estimation de la position 3D et du diamètre des particules



Restitution par la méthode classique

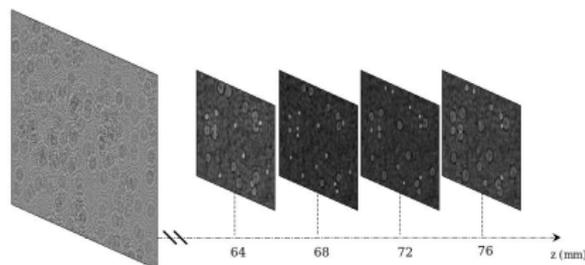
Restitution numérique



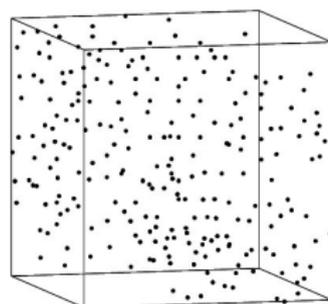
- Correspond à une convolution de l'hologramme par une fonction de Fresnel dans différents plans (z).
- Résultat : Image 3D restituée.

Restitution par la méthode classique

Restitution numérique



Segmentation



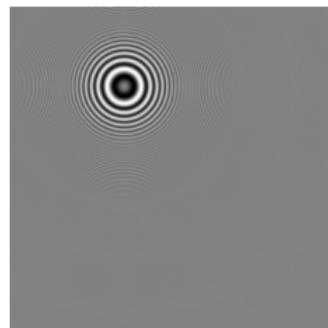
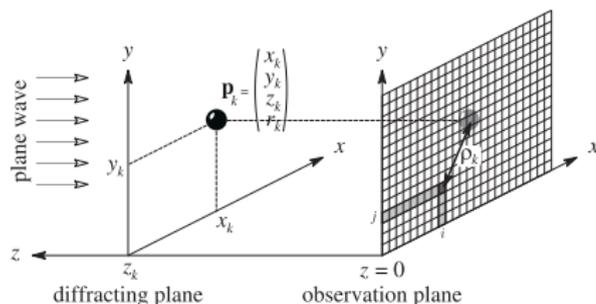
- Correspond à une convolution de l'hologramme par une fonction de Fresnel dans différents plans (z).
- Résultat : Image 3D restituée.

- Position 3D
- Taille

Principale limitations

- Faible précision :
 - Sur l'axe des z : 10 pixels (environ $50\mu m$)
- Les effets de bords :
 - Génère une perte de précision sur les bords de l'hologramme
 - Réduit le champ d'étude
- Faible taille de champ :
 - Limité à une taille inférieure à celle du capteur.
- Faible concentration de particules :
 - Le rapport entre la surface du capteur et la surface projetée des particules doit être inférieur à 5% (env. 3000 particules)
- Temps de calcul :
 - Environ 10 minutes par hologramme

Modèle d'un hologramme



- Paramètres d'une particule : position 3D (x_k, y_k, z_k) et rayon (r_k)
- Figure de diffraction d'une particule sphérique :

$$g_k[i, j] = \frac{\pi r_k^2}{\lambda z_k} J_1 c \left(\frac{2\pi r_k \rho_k[i, j]}{\lambda z_k} \right) \sin \left(\frac{\pi \rho_k^2[i, j]}{\lambda z_k} \right)$$

- Modèle d'un hologramme

$$m[i, j] = I_0 - \sum_{k=1}^n \alpha_k g_k[i, j]$$

Formulation problèmes inverses

- **Problème direct (bien connu) :**

Seulement 4 paramètres nécessaires pour calculer la contribution d'une particule sphérique sur l'hogramme.

- **Problème inverse :**

Quel est l'ensemble de paramètres $\{\{x_1, y_1, z_1, r_1\}, \{x_2, y_2, z_2, r_2\}, \dots\}$ qui explique au mieux les données ?

$$\mathcal{P} = \sum_{i,j}^{pixels} w[i,j] (m[i,j] - d[i,j])^2$$

← modèle d'hogramme

→ donnée : hogramme numérique

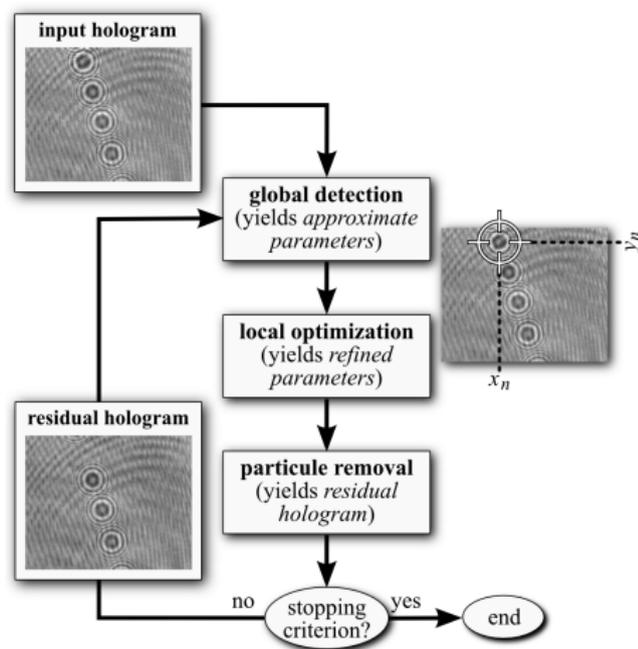
avec $m[i,j] = I_0 - \sum_{k=1}^n \alpha_k g_k[i,j]$ et $w[i,j]$ matrice de poids

Un algorithme itératif

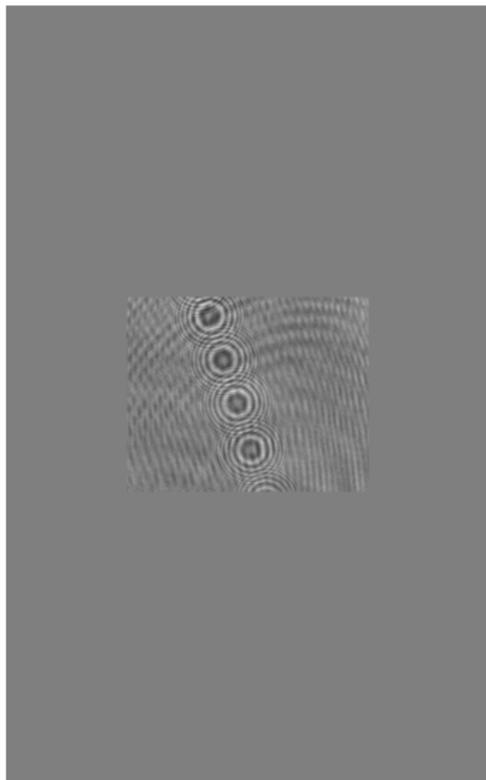
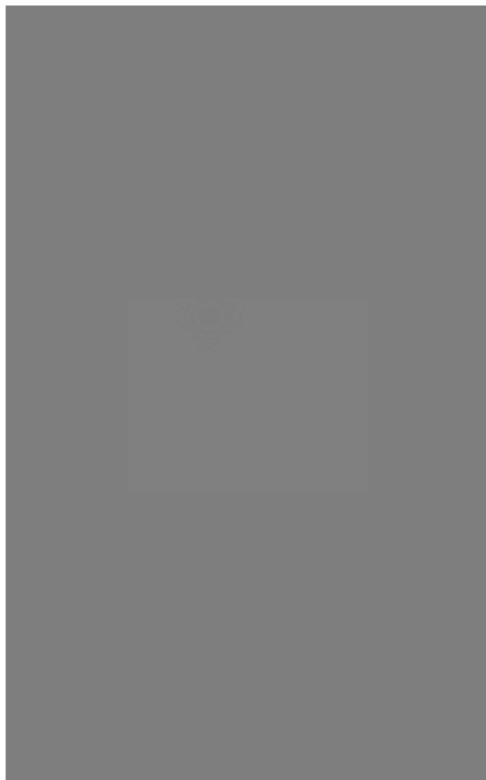
Algorithme itératif (3 étapes) de type (*Matching Pursuit*)

- Détection locale,
- Raffinement des paramètres,
- Suppression de la contribution de la particule

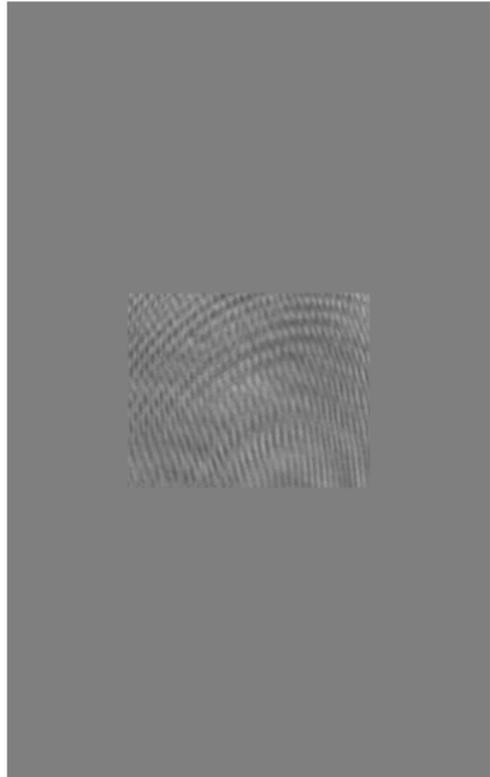
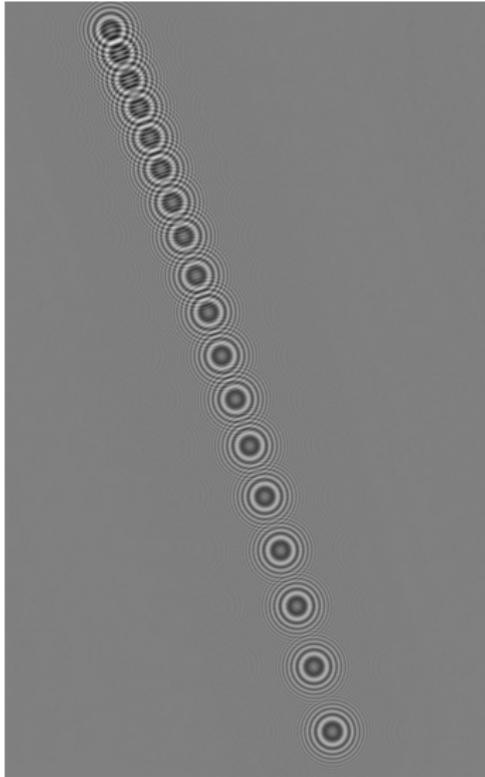
Critère d'arrêt : détection de particules aberrantes



Détection hors-champs



Détection hors-champs



Caractéristiques de l'algorithme

● Améliorations :

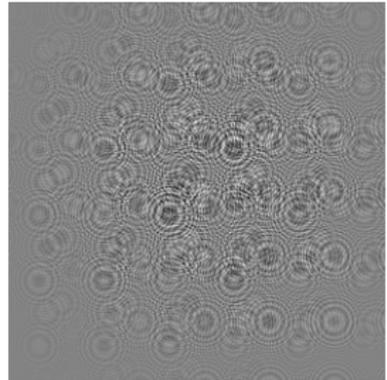
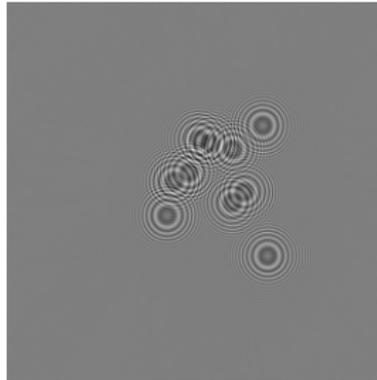
- Meilleure précision [Soulez07a] :
 - transversale : $0.3\mu m$ (1/20 pixels)
 - longitudinale : $0.9\mu m$ (1/7 pixels)
 - taille : $0.04\mu m$
- Détection hors-champs (jusqu'à un facteur 16) [Soulez07b]
- Insensibilité aux images fantômes [Gire08a]
- Amélioration du rapport signal sur bruit durant le traitement [Gire08b]

● Inconvénients :

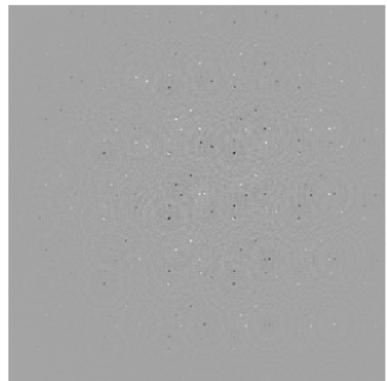
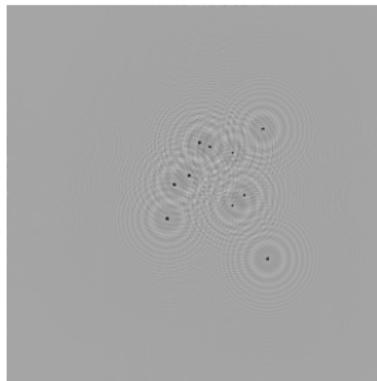
- Limité à un modèle géométrique donné (particules sphériques)
- Temps de traitement relativement long (5 minutes/particule)

Moiré

Hologramme



Restitution



Moiré

- **Avec l'approche classique :**

- Distance minimale z_{min} imposée pour éviter l'apparition de repliement
- Si $z < z_{min}$, apparition d'images fantômes dans la restitution

- **Avec l'approche inverse :**

- Le phénomène est pris en compte dans le modèle
- Nettoyage avec la figure complète (contenant le repliement)
- Détection en fonction de la vraisemblance :
 - L'effet de Moiré a moins d'énergie que la vraie particule
 - L'enveloppe de diffraction du Moiré est différente du modèle

Intégration sur le pixel

- Filtrage passe-bas du signal sur la surface sensible du capteur
- Correspond à un fenêtrage de signal par un sinus cardinal
- **Approche classique :**
 - Pas de prise en compte car limité avant par le théorème de Shannon
 - Si $z < z_{min}$, filtrage passe-bas des images restituées
- **Approche problème inverse :**
 - Possibilité d'aller au delà de théorème de Shannon
 - L'effet peut être important pour la détection hors-champs
 - Doit être pris en compte dans le modèle

Intégration sur le pixel

- Prise en compte de l'intégration sur le pixel dans le modèle :
 - Corrige la déformation du modèle direct
 - Supprime le biais sur l'estimation de la taille des particules
- Effet non compensable : atténuation des hautes fréquences
 - Donne une limite maximale théorique pour la taille du champ accessible

Principe de la minimisation itérative

- A l'itération ℓ , minimisation de :

$$\mathcal{P}_\ell = \sum_{i,j}^{pixels} w[i,j] (m_\ell[i,j] - d_\ell[i,j])^2$$

\swarrow modèle de la $\ell^{\text{ème}}$ particule \searrow données résiduelles

- Données résiduelles :

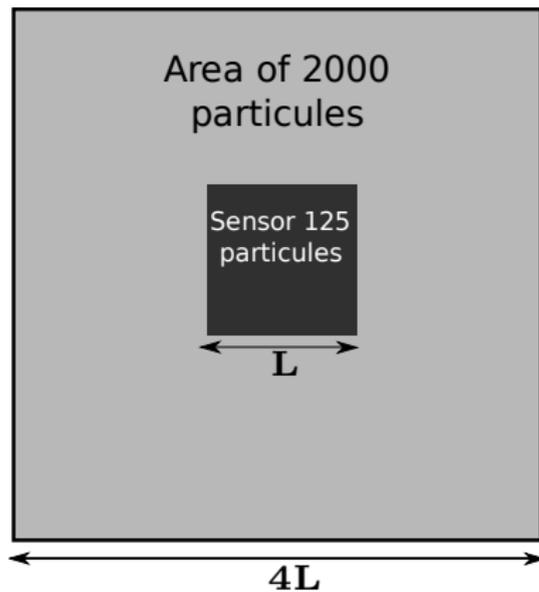
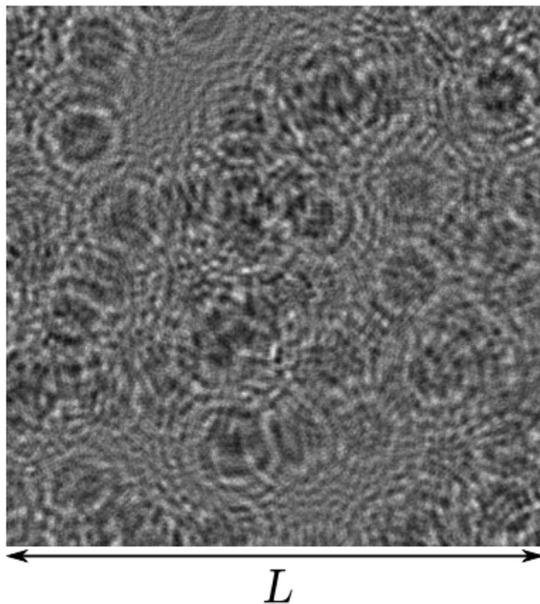
$$d_\ell[i,j] = d - \sum_{k=1}^{\ell-1} \alpha_k g_k[i,j]$$

$$d_\ell[i,j] = \underbrace{I_0}_{\text{signal}} - \underbrace{\alpha_\ell g_\ell[i,j]}_{\text{signal}} - \underbrace{\sum_{k=\ell+1}^n \alpha_k g_k[i,j]}_{\text{bruit particules résiduelles}} + \underbrace{I_{bg}[i,j]}_{\text{bruit de fond}}$$

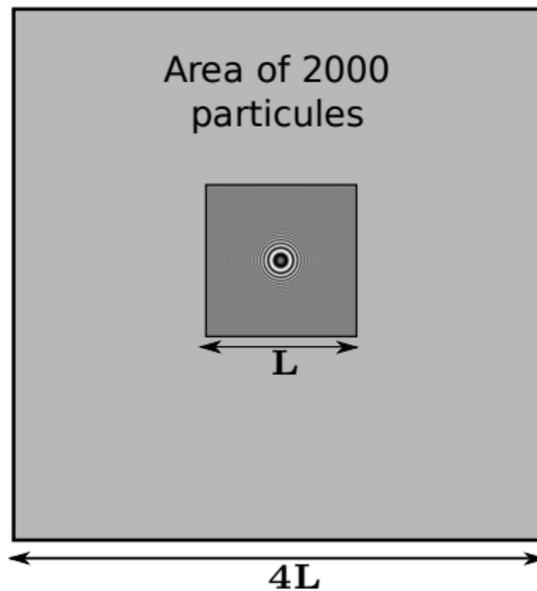
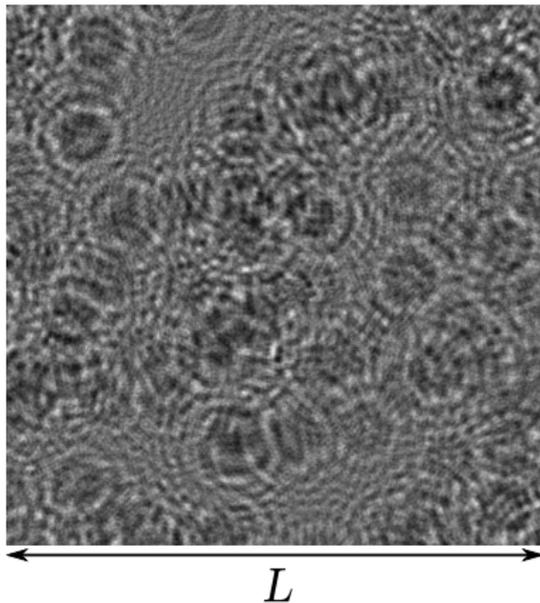
$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{bruit}}$

→ Définition d'un RSB

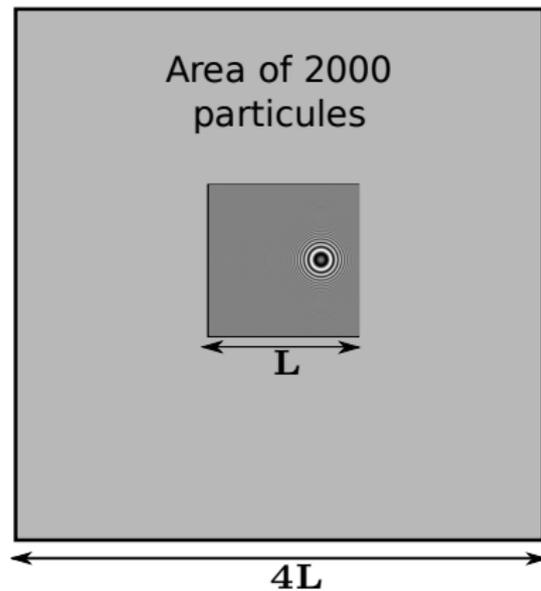
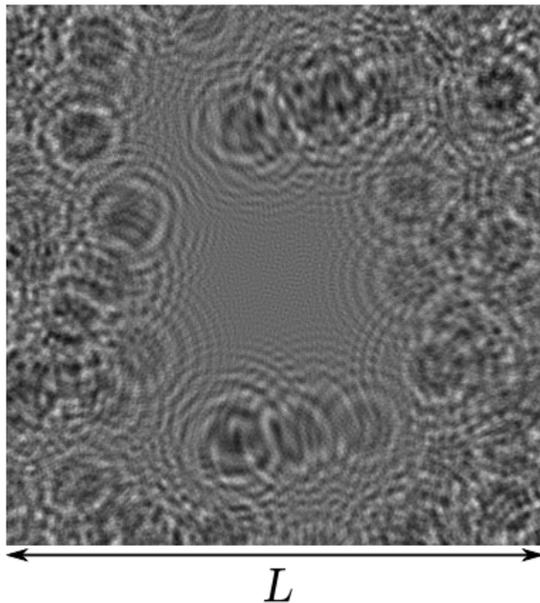
Paramètres



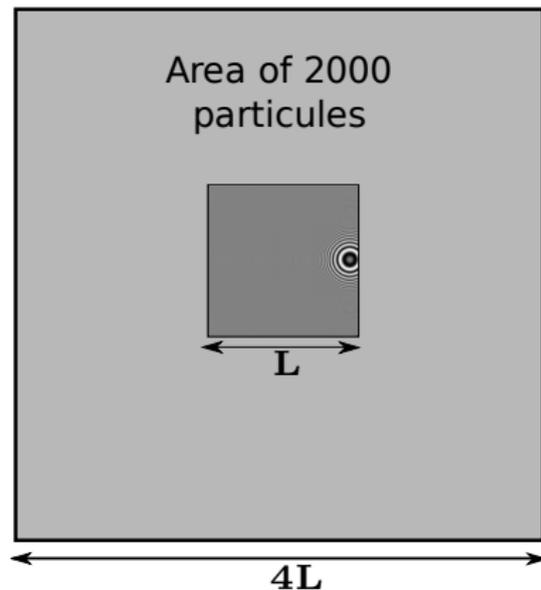
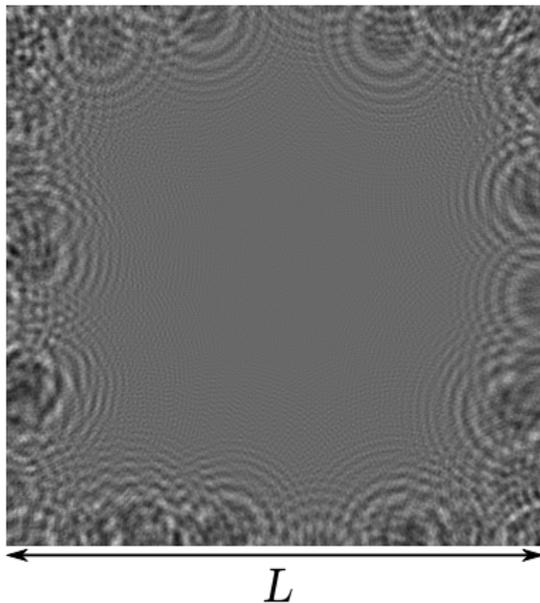
Itération $\ell=1$



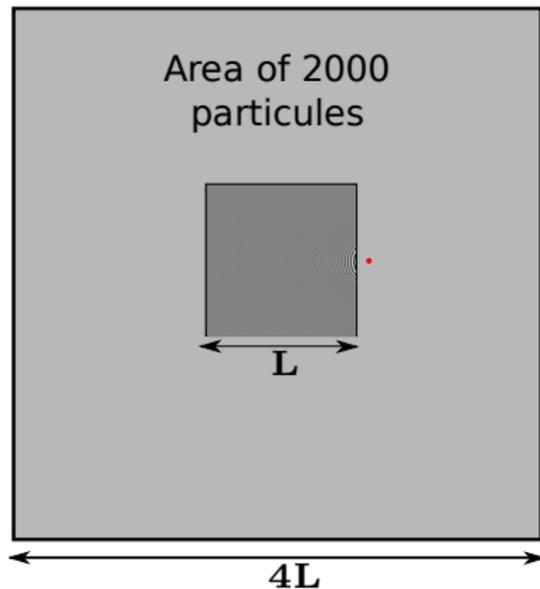
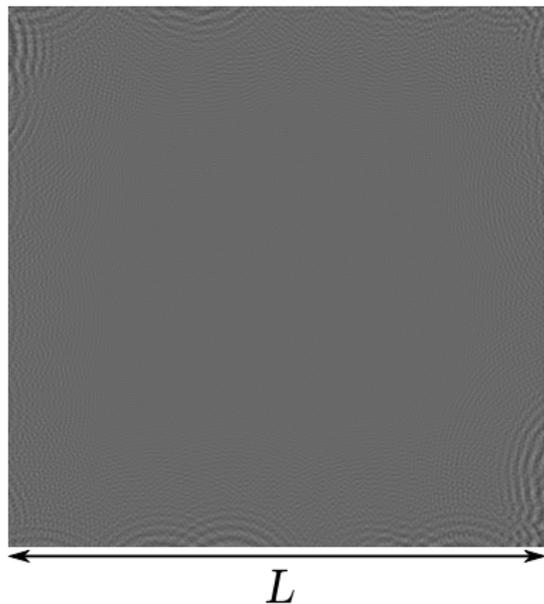
Itération $\ell=25$



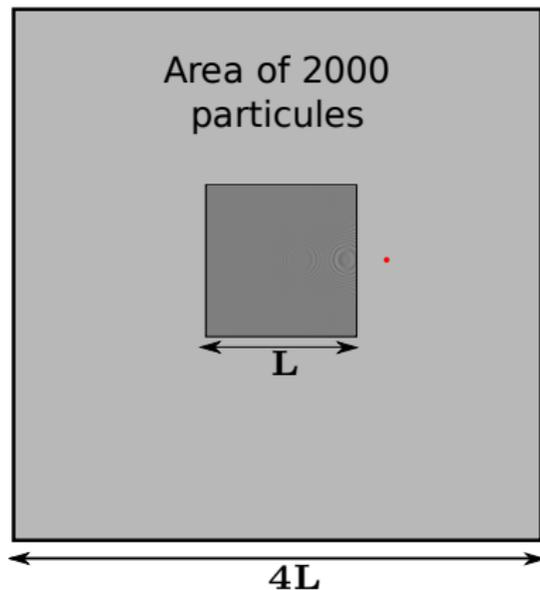
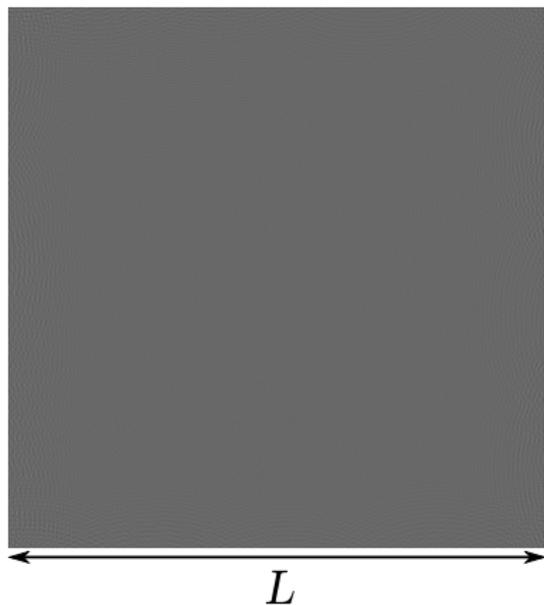
Itération $\ell=100$



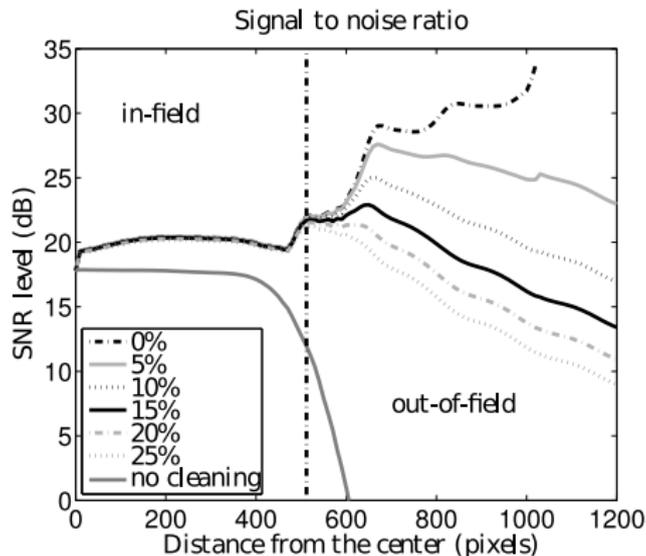
Itération $\ell=160$



Itération $\ell=250$



Etude théorique



Conclusion

- Possibilité de détection hors-champ (extension du champ d'étude d'un facteur 16)
- Amélioration de la précision d'un facteur 5
- Phénomène de repliement pris en compte dans le modèle
- Suppression du biais sur l'estimation de la taille (intégration sur le pixel)
- Modèle théorique du RSB permet la compréhension des possibilités de l'algorithme
- Prise en compte d'autres paramètres (divergence de l'onde, inclinaison du capteur...)

Références

-  F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, E. Thiébaud, and C. Goepfert, “Inverse problem approach for particle digital holography : accurate location based on local optimisation,” J. Opt. Soc. Am. A **24(4)** (2007).
-  F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, E. Thiébaud, and C. Goepfert, “Inverse problem approach in particle digital holography : out-of-field particle detection made possible”, J. Opt. Soc. Am. A **24(12)** (2007).
-  J. Gire, L. Denis, C. Fournier, E. Thiébaud, F. Soulez and C. Ducottet, “Digital holograph of particles : benefits for the inverse problem approach”, Meas. Sci. Technol, **19** (2008).
-  J. Gire, C. Ducottet, L. Denis, E. Thiebaut, and F. Soulez, “Signal to noise characterization of an inverse problem-based algorithm for digital inline holography”, ISFV13, 13th International Symposium on Flow Visualization, Nice : France (2008)