

# **Prix Pierre Laffitte : super-résolution sans-grille, l'imagerie pour étudier le cœur des cellules**

---

Bastien Laville

21 octobre 2022

Projet Morpheme (Inria, CNRS, UCA)

Prix Pierre Laffite : Mines Paris-PSL & Fondation Mines ParisTech

## La thèse et son contexte

- **Titre** : « *Super-résolution sans-grille : courbes statiques et dynamiques* »
- **Financée par** l'allocation EUR-DS4H depuis octobre 2020 (école doctorale STIC)
- **Préparée au sein de** l'équipe Morpheme (Inria, CNRS, UCA)
- **Encadrée par** Dr. Laure Blanc-Féraud et Pr. Gilles Aubert.



Bastien Laville



Laure Blanc-Féraud

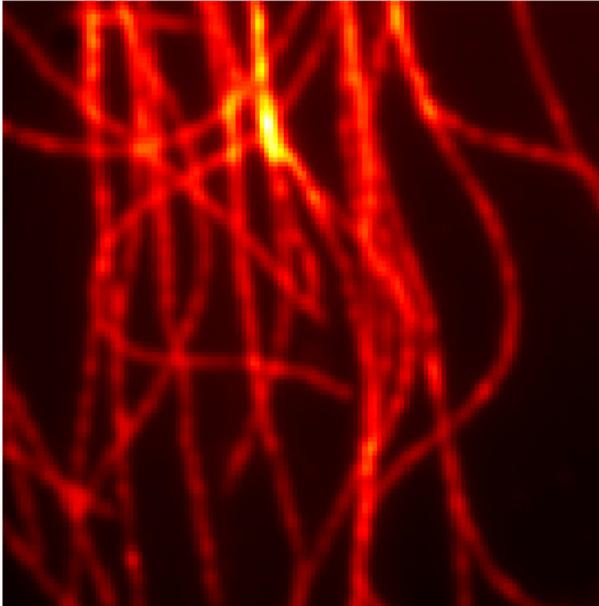


Gilles Aubert

# Motivation

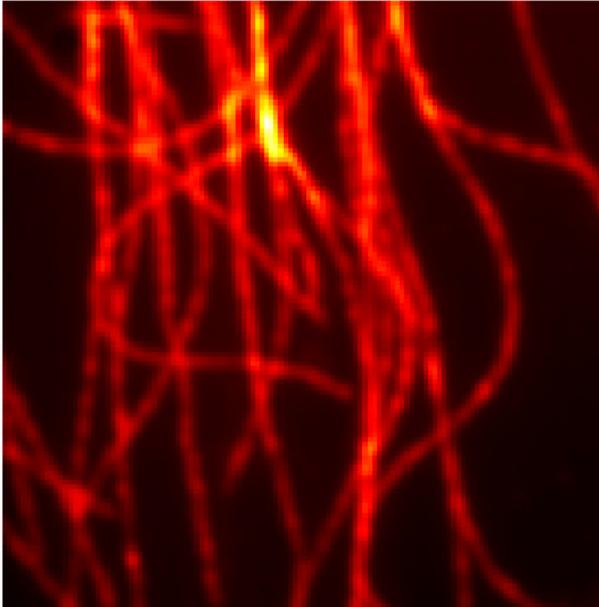
---

## Comment reconstruire des structures biologiques à partir d'acquisition de mauvaise qualité?



Acquisition au microscope

# Comment reconstruire des structures biologiques à partir d'acquisition de mauvaise qualité?



Acquisition au microscope

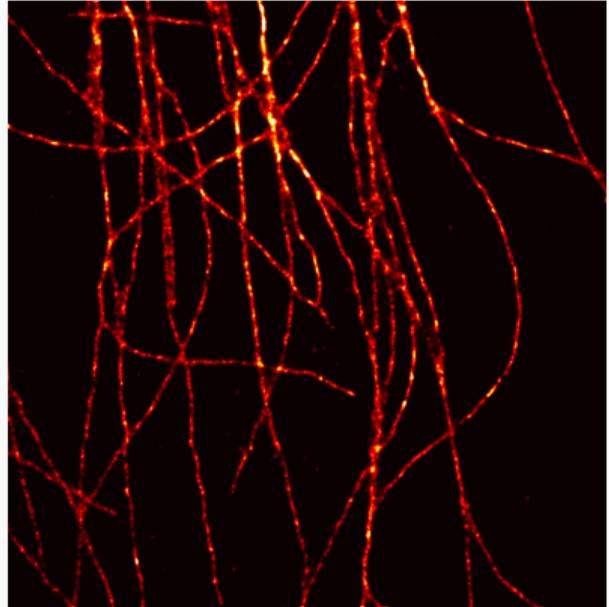
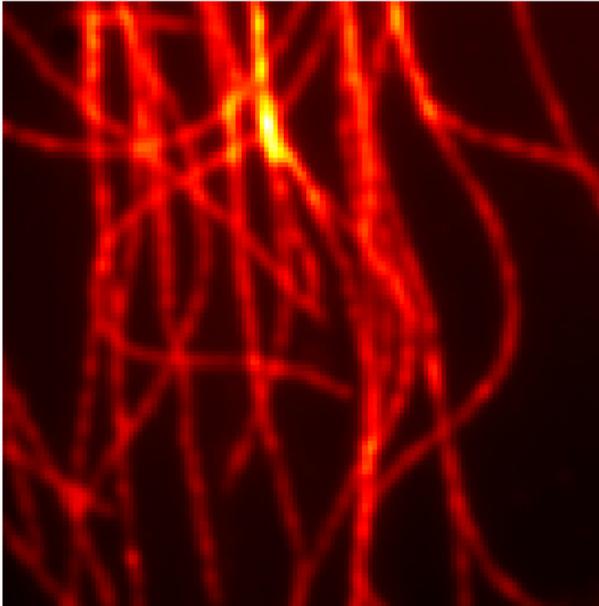


Image à reconstruire

Comment reconstruire des structures biologiques à partir d'acquisition de mauvaise qualité? Il s'agit d'un **problème inverse**.



Acquisition au microscope

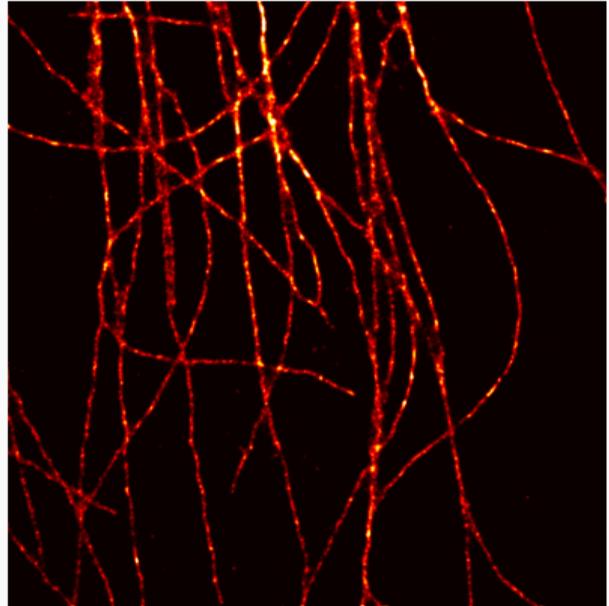


Image à reconstruire

## Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Un *problème inverse* consiste à déterminer une grandeur non directement observable à partir de données expérimentales.

## Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Un *problème inverse* consiste à déterminer une grandeur non directement observable à partir de données expérimentales.

*'Can one hear the shape of a drum?'*,  
Marc Kac (1966)



Marc Kac. Crédit : Mathematisches Institut  
Oberwolfach

# Qu'est-ce qu'un problème inverse ?



Source



Problème direct



Observation

# Qu'est-ce qu'un problème inverse ?



Source

Problème inverse



Problème direct



Observation

## Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Les trois critères d'un problème *bien posé* :

# Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Les trois critères d'un problème *bien posé* :

- la solution existe;



Aucune source

Problème inverse



Observation

# Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Les trois critères d'un problème *bien posé* :

- la solution existe;
- la solution est unique;



Problème inverse



Sources

Observation

# Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Les trois critères d'un problème *bien posé* :

- la solution existe;
- la solution est unique;
- la solution dépend continûment de l'observation.



Source

← Problème inverse



Observation

# Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

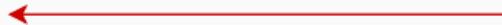
Les trois critères d'un problème *bien posé* :

- la solution existe;
- la solution est unique;
- la solution dépend continûment de l'observation.



Source

Problème inverse



Observation

# Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Les trois critères d'un problème *bien posé* :

- la solution existe;
- la solution est unique;
- la solution dépend continûment de l'observation.



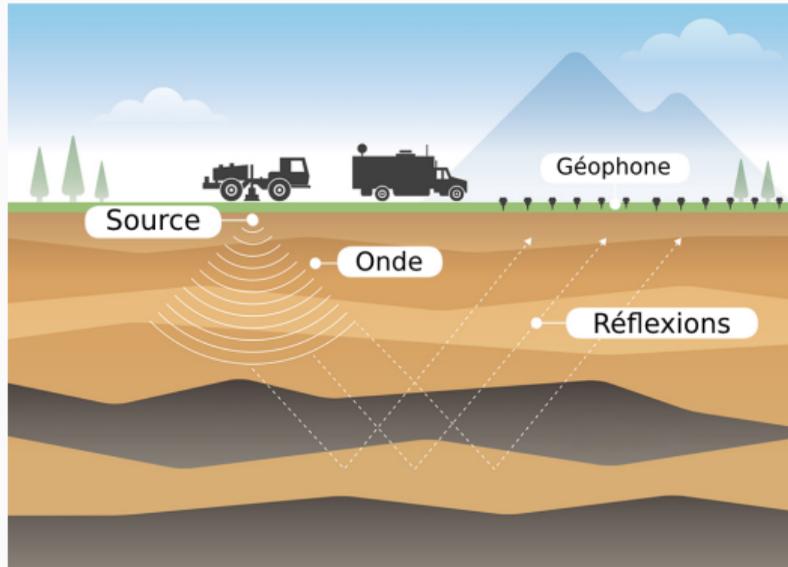
Source

Problème inverse



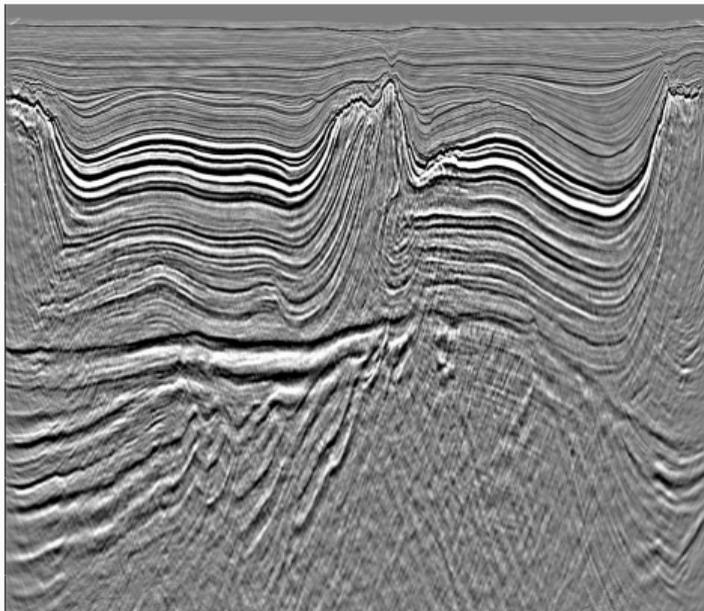
Observation

# Domaines d'application



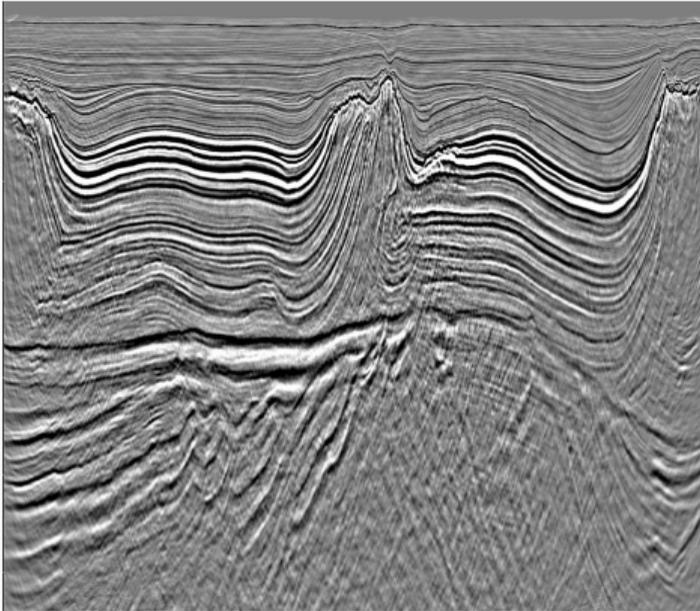
Imagerie sismique, magnétique, prospection pétrolière, étude en environnement hostile. Adapté de *Energy Information Australia*.

## Domaines d'application

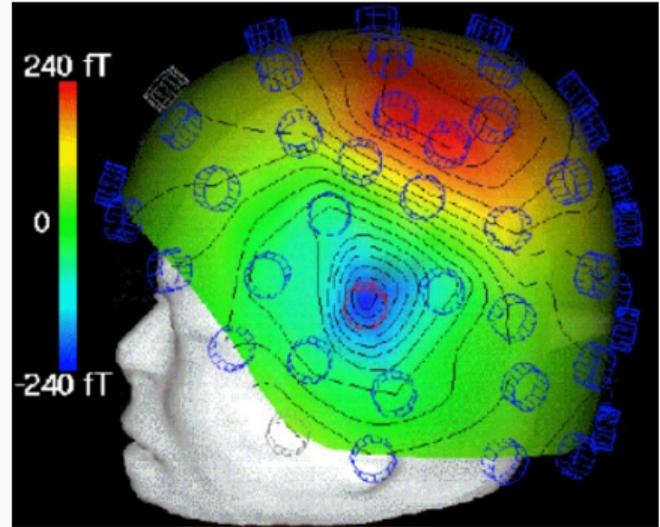


Imagerie sismique, magnétique, prospection pétrolière, étude en environnement hostile. Adapté de *Energy Information Australia*.

## Domaines d'application



Imagerie sismique, magnétique, prospection pétrolière, étude en environnement hostile. Adapté de *Energy Information Australia*.



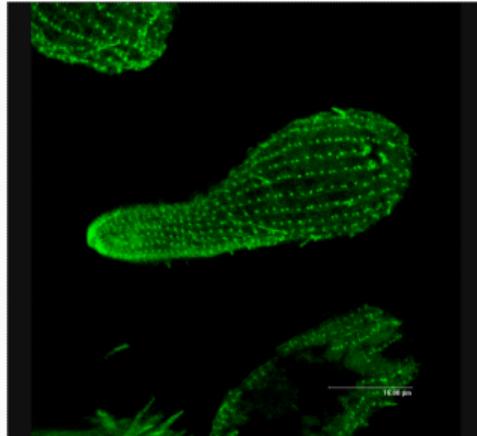
Imagerie biomédicale : scanner IRM, échographie, microscopie.

## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

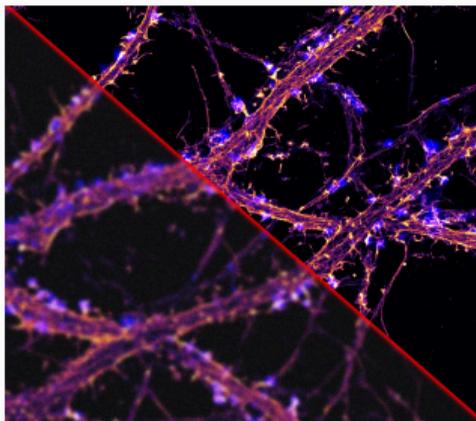


Crédit : Pawel Jasnos, Nencki Institute of Experimental Biology, Warsaw.

## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

Limitation **physique** à cause de la **diffraction** pour des corps  $< 200$  nm : convolution par la *point spread function* (PSF) du microscope.

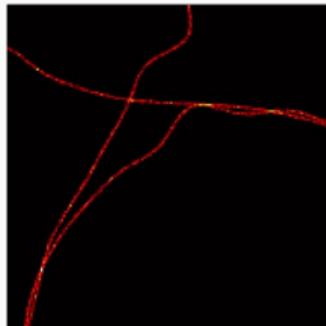


Crédit : Christophe Leterrier, CNRS-Aix Marseille Université.

## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

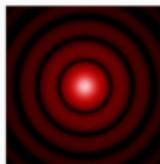
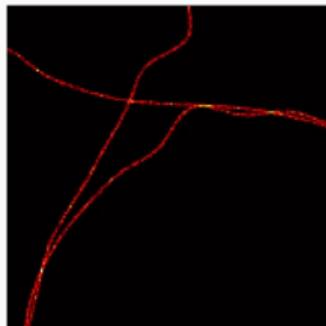
Limitation **physique** à cause de la **diffraction** pour des corps  $< 200$  nm : convolution par la *point spread function* (PSF) du microscope.



## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

Limitation **physique** à cause de la **diffraction** pour des corps  $< 200$  nm : convolution par la *point spread function* (PSF) du microscope.

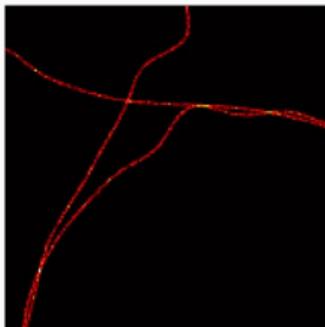


PSF

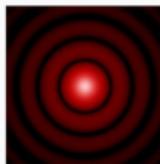
## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

Limitation **physique** à cause de la **diffraction** pour des corps  $< 200$  nm : convolution par la *point spread function* (PSF) du microscope.



\*



PSF

+

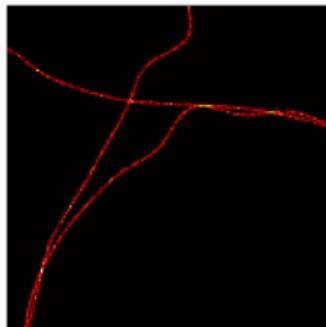


bruits

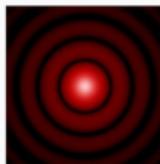
## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

Limitation **physique** à cause de la **diffraction** pour des corps  $< 200$  nm : convolution par la *point spread function* (PSF) du microscope.



\*



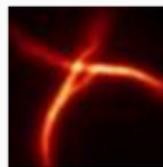
PSF

+



bruits

=

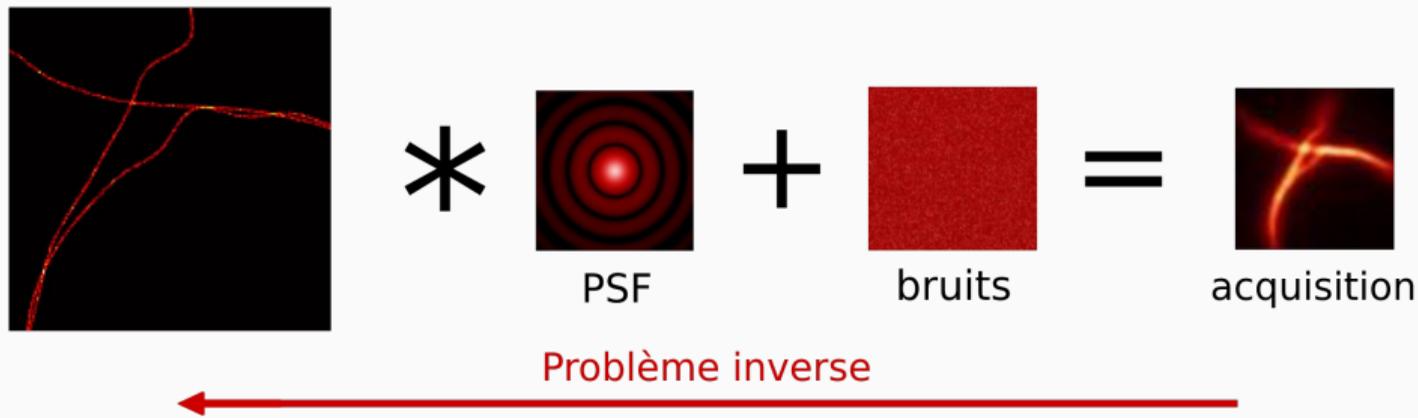


acquisition

## Objectif

Imager des structures biologiques **vivantes** à de **petites échelles**.

Limitation **physique** à cause de la **diffraction** pour des corps  $< 200$  nm : convolution par la *point spread function* (PSF) du microscope.



## **Reconstruction de sources ponctuelles**

---

## Approche variationnelle

- $S_0$  la source à reconstruire;

## Approche variationnelle

- $S_0$  la source à reconstruire;
- elle est observée à travers l'acquisition  $y$ : flou  $\Phi$ , bruits...;

## Approche variationnelle

- $S_0$  la source à reconstruire;
- elle est observée à travers l'acquisition  $y$ : flou  $\Phi$ , bruits...;
- comment trouver une reconstruction  $\hat{S}$  à partir de  $y$ ?

## Approche variationnelle

- $S_o$  la source à reconstruire;
- elle est observée à travers l'acquisition  $y$ : flou  $\Phi$ , bruits...;
- comment trouver une reconstruction  $\hat{S}$  à partir de  $y$ ?

### Optimisation variationnelle

- utiliser un *a priori* sur  $S_o$ ;

## Approche variationnelle

- $S_o$  la source à reconstruire;
- elle est observée à travers l'acquisition  $y$ : flou  $\Phi$ , bruits...;
- comment trouver une reconstruction  $\hat{S}$  à partir de  $y$ ?

### Optimisation variationnelle

- utiliser un *a priori* sur  $S_o$ ;
- parmi toutes les sources  $S$ , chercher celles qui vérifient l'*a priori*;

## Approche variationnelle

- $S_o$  la source à reconstruire;
- elle est observée à travers l'acquisition  $y$ : flou  $\Phi$ , bruits...;
- comment trouver une reconstruction  $\hat{S}$  à partir de  $y$ ?

### Optimisation variationnelle

- utiliser un *a priori* sur  $S_o$ ;
- parmi toutes les sources  $S$ , chercher celles qui vérifient l'*a priori*;
- $\hat{S}$  minimise  $S \mapsto \|y - \Phi S\|_2^2 + \alpha R(S)$ ;

## Approche variationnelle

- $S_o$  la source à reconstruire;
- elle est observée à travers l'acquisition  $y$ : flou  $\Phi$ , bruits...;
- comment trouver une reconstruction  $\hat{S}$  à partir de  $y$ ?

### Optimisation variationnelle

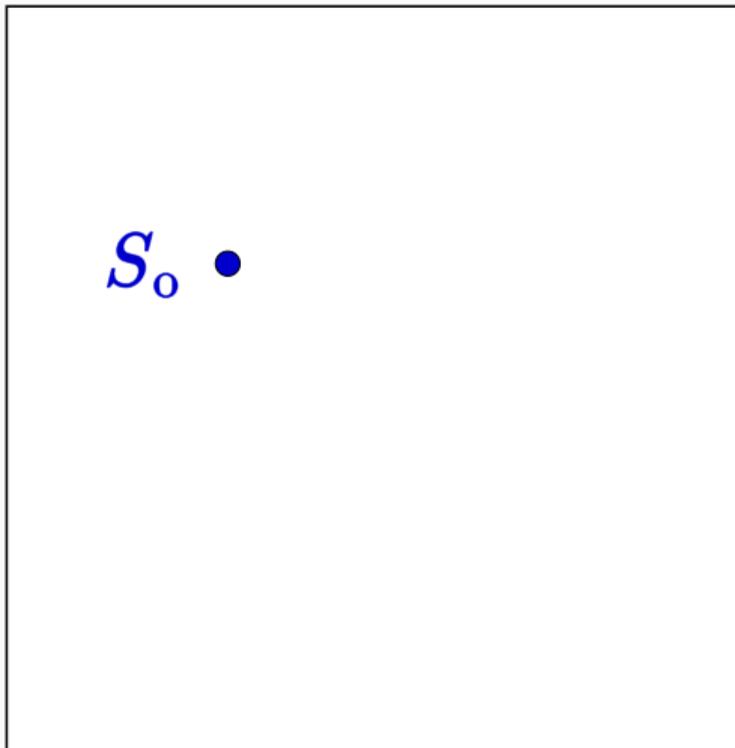
- utiliser un *a priori* sur  $S_o$ ;
- parmi toutes les sources  $S$ , chercher celles qui vérifient l'*a priori*;
- $\hat{S}$  minimise  $S \mapsto \|y - \Phi S\|_2^2 + \alpha R(S)$ ;
- $\|y - \Phi S\|_2^2$  favorise la proximité entre  $y$  et la source  $S$ ;

## Approche variationnelle

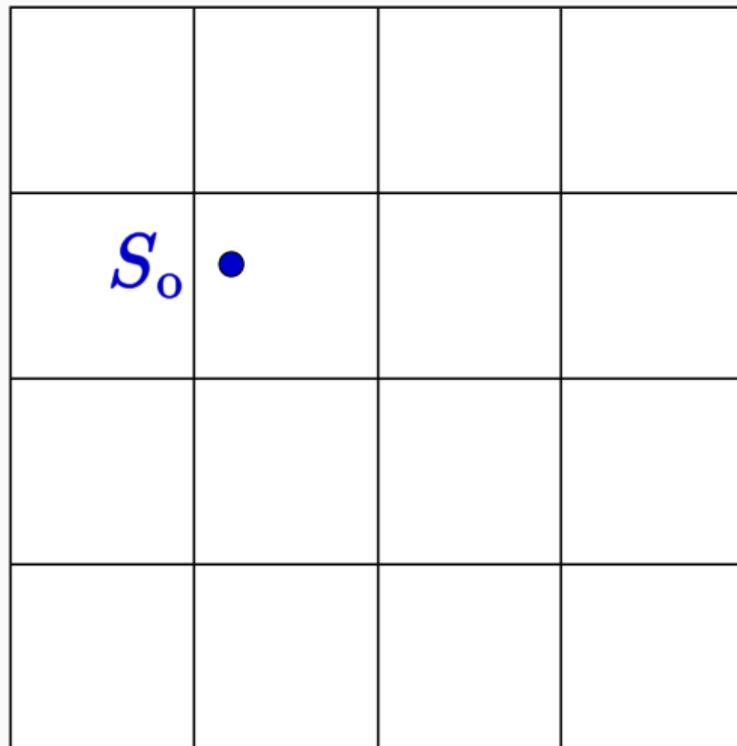
- $S_0$  la source à reconstruire;
- elle est observée à travers l'acquisition  $y$ : flou  $\Phi$ , bruits...;
- comment trouver une reconstruction  $\hat{S}$  à partir de  $y$ ?

### Optimisation variationnelle

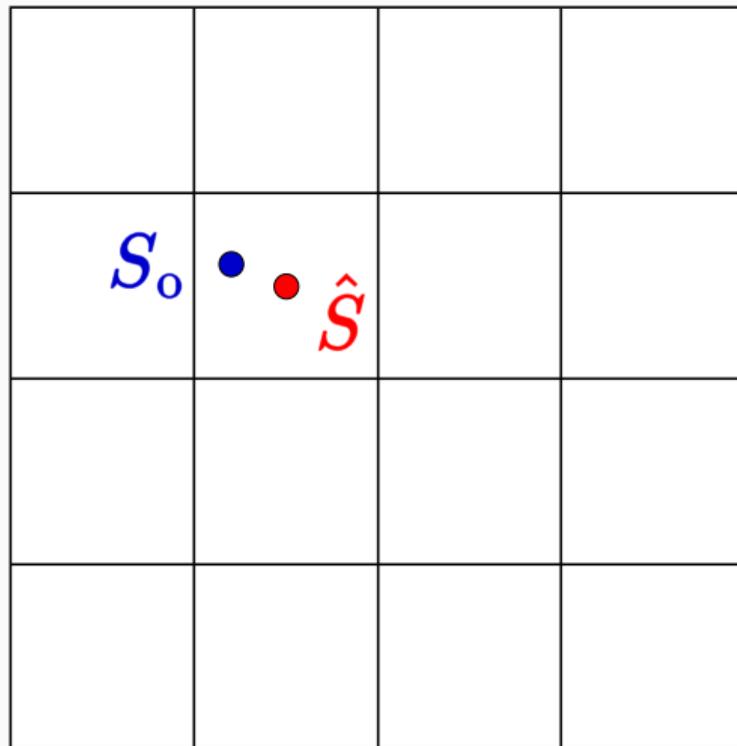
- utiliser un *a priori* sur  $S_0$ ;
- parmi toutes les sources  $S$ , chercher celles qui vérifient l'*a priori*;
- $\hat{S}$  minimise  $S \mapsto \|y - \Phi S\|_2^2 + \alpha R(S)$ ;
- $\|y - \Phi S\|_2^2$  favorise la proximité entre  $y$  et la source  $S$ ;
- $R(S)$  régularise le problème d'optimisation (mieux posé) et favorise plus ou moins l'*a priori* sur  $S$  par  $\alpha > 0$ .



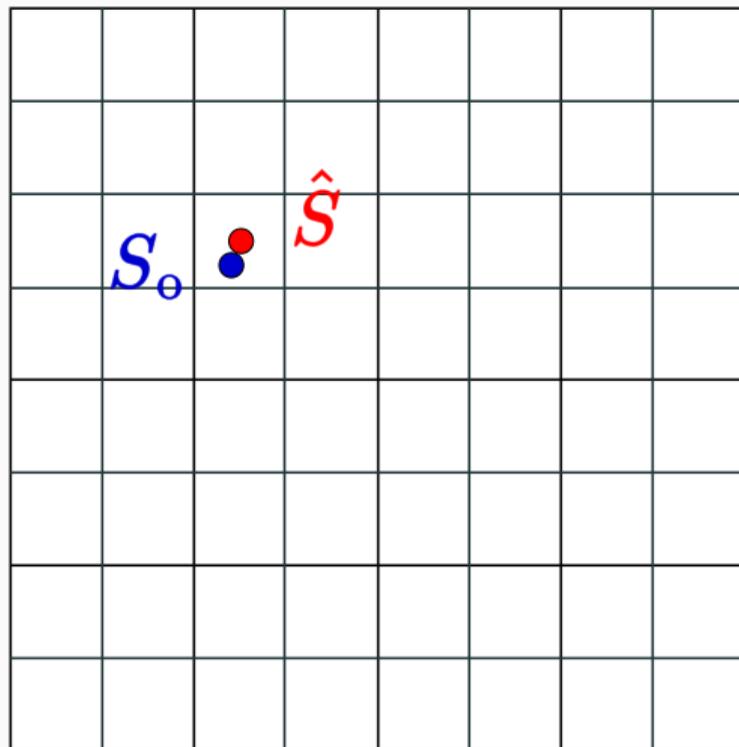
Source à estimer



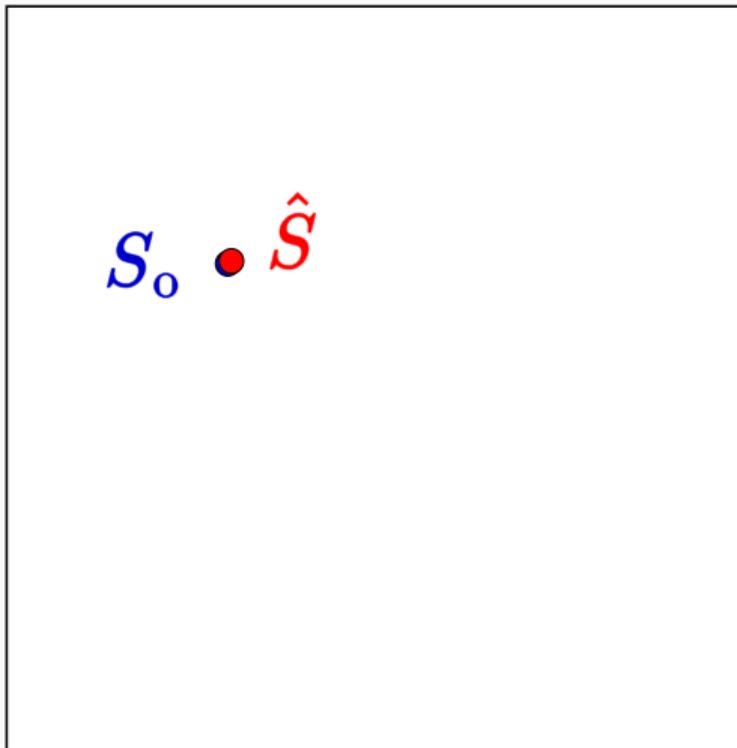
Introduction d'une grille



Reconstruction  $\hat{S}$  sur grille



Reconstruction  $\hat{S}$  sur grille plus fine



Reconstruction  $\hat{S}$  **sans-grille**

# Philosophie du sans-grille

Crédit : *Lunch atop a Skyscraper*, Charles Clyde Ebbets (1932)



Photo argentique (sans-grille)

# Philosophie du sans-grille

Crédit : *Lunch atop a Skyscraper*, Charles Clyde Ebbets (1932)



Photo argentique (sans-grille)



Photo numérique (avec grille)

# Philosophie du sans-grille

Crédit : *Lunch atop a Skyscraper*, Charles Clyde Ebbets (1932)



Photo argentique (sans-grille)

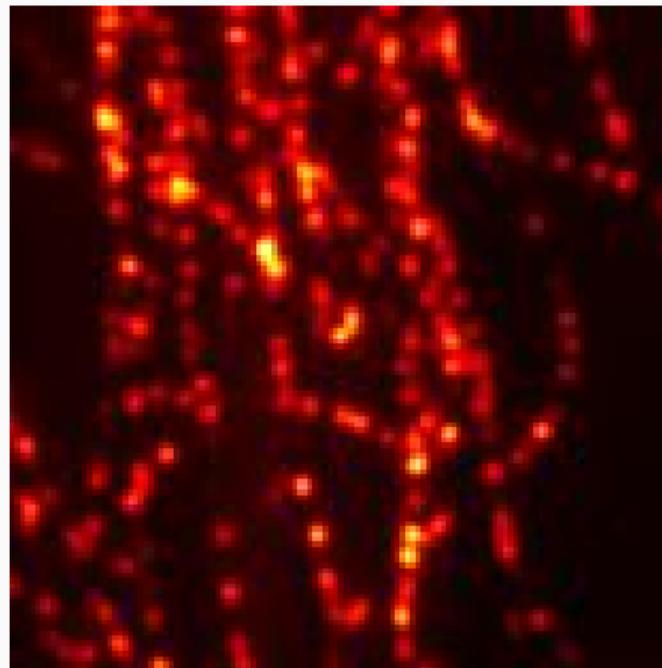


Photo numérique (avec grille)

## Avantages

Pas de bruit d'échantillonnage, moins de ressources matérielles.

- Adapté pour plusieurs types d'imagerie : microscopie de fluorescence, IRM,...



---

1. [gitlab.inria.fr/blaville/off-the-grid-python](https://gitlab.inria.fr/blaville/off-the-grid-python)

# Mon logiciel pour la reconstruction de points<sup>1</sup>

- Adapté pour plusieurs types d'imagerie : microscopie de fluorescence, IRM,...
- Documenté, avec tutoriels;

## 1. Off-the-grid Dirac reconstruction from one image

### Deconvolution with Sliding Frank-Wolfe

Let  $\Phi : \mathcal{M}(\mathcal{X}) \rightarrow \mathcal{H}$  be the forward operator,  $\mathcal{H}$  be the Hilbert space of acquisitions, typically  $\mathcal{H} = L^2(\mathcal{X})$  or pixels. Let us introduce the functional BLASSO, standing for *Beurling-LASSO*:

$$\operatorname{argmin}_{m \in \mathcal{M}(\mathcal{X})} \|y - \Phi m\|_{\mathcal{H}}^2 + \lambda \|m\|_{\text{TV}}. \quad (\mathcal{P}_\lambda(y))$$

Generate the domain  $\mathcal{X}$  settings, here  $\mathcal{X} = [0, 1]^2$ .

```
N_ECH = 64 # Number of pixels along x or y dimension
X_GAUCHE = 0 # Left bound
X_DROIT = 1 # Right bound

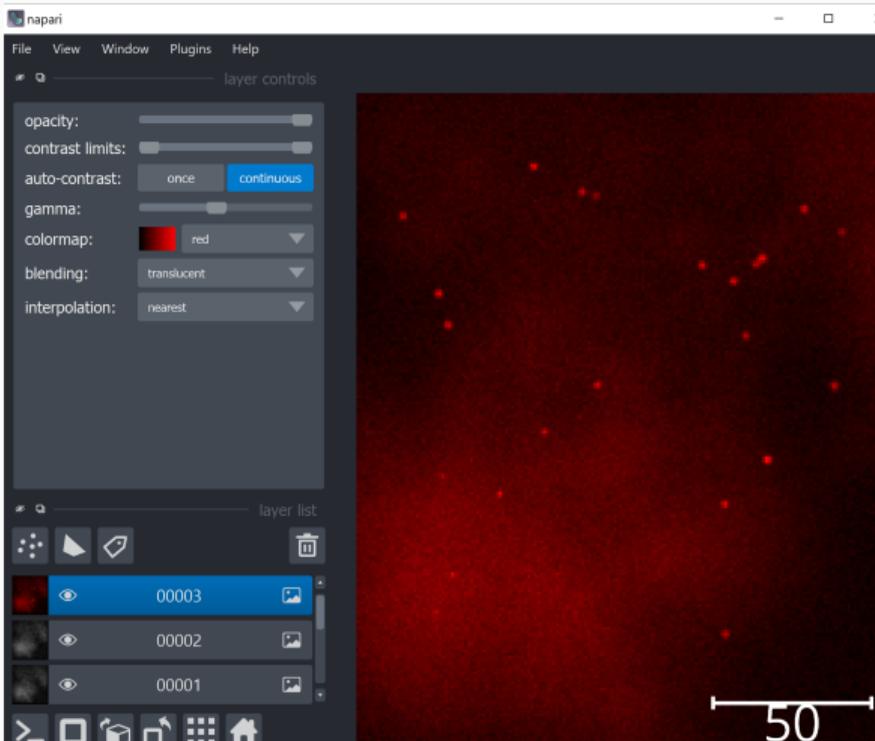
# All these informations are stored in the domain object.
# Following the PyTorch paradigm, we transfer the object either to the CPU or the GPU
domain = offgrid.Domain2D(X_GAUCHE, X_DROIT, N_ECH, dev=device)
domain_cpu = offgrid.Domain2D(X_GAUCHE, X_DROIT, N_ECH)
```

---

1. [gitlab.inria.fr/blaville/off-the-grid-python](https://gitlab.inria.fr/blaville/off-the-grid-python)

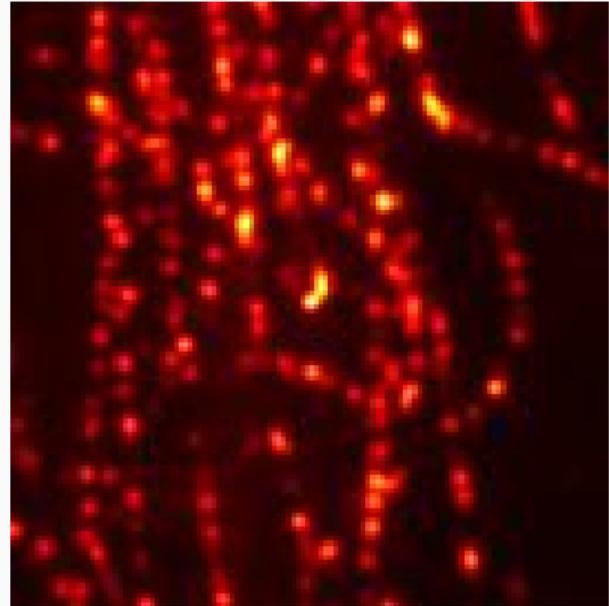
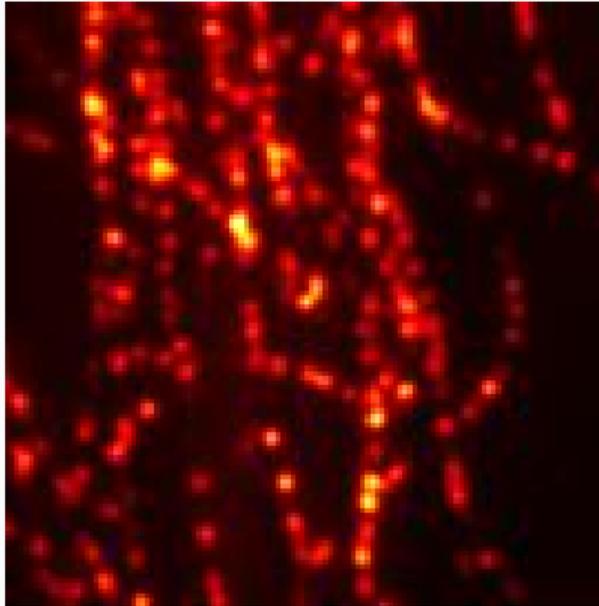
# Mon logiciel pour la reconstruction de points<sup>1</sup>

- Adapté pour plusieurs types d'imagerie : microscopie de fluorescence, IRM,...
- Documenté, avec tutoriels;
- à destination des biologistes et des médecins avec une interface graphique.



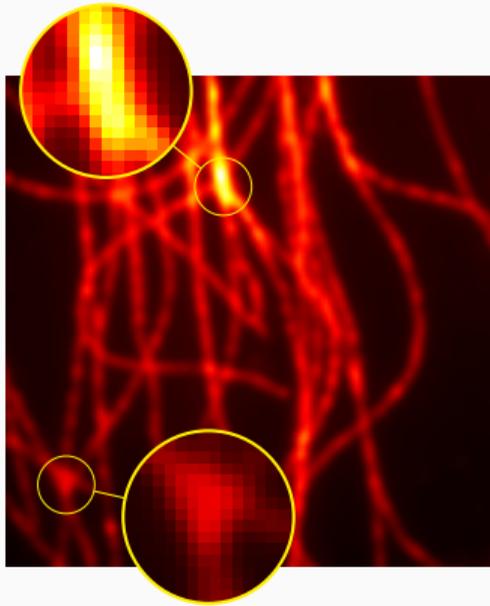
1. [gitlab.inria.fr/blaville/off-the-grid-python](https://gitlab.inria.fr/blaville/off-the-grid-python)

## Résultats de reconstruction



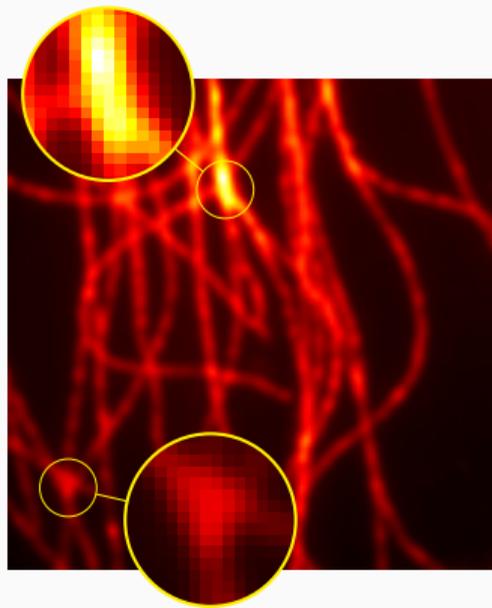
10000 images en microscopie fluorescente

# Résultats de reconstruction

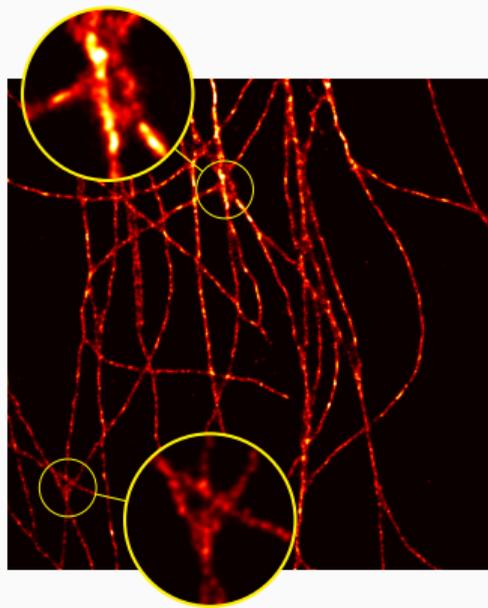


Acquisition

# Résultats de reconstruction



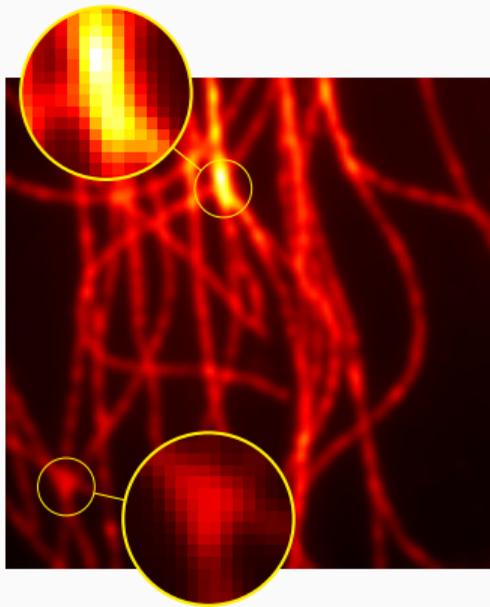
Acquisition



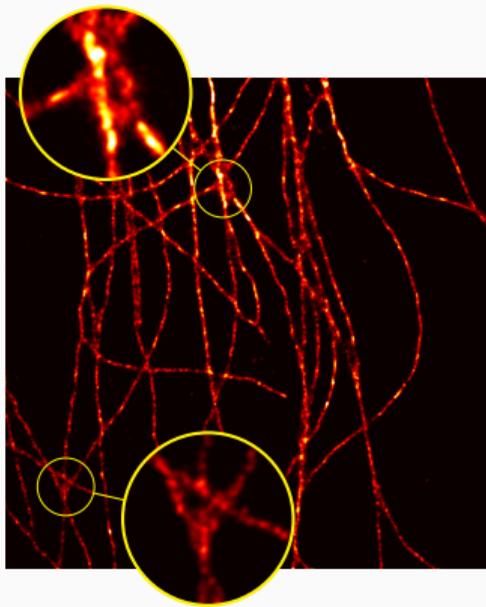
Sans-grille (B. Lavielle et al.)

Problème variationnel sans-grille :  $m \mapsto \|y - \Phi m\|_2^2 + \alpha \|m\|_{TV}$ .

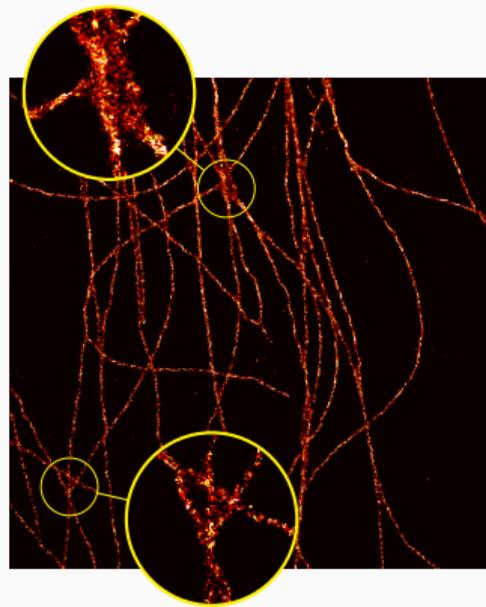
# Résultats de reconstruction



Acquisition



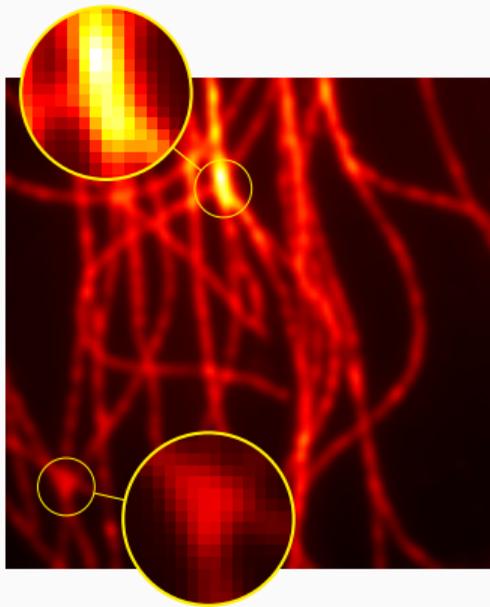
Sans-grille (B. Laville et al.)



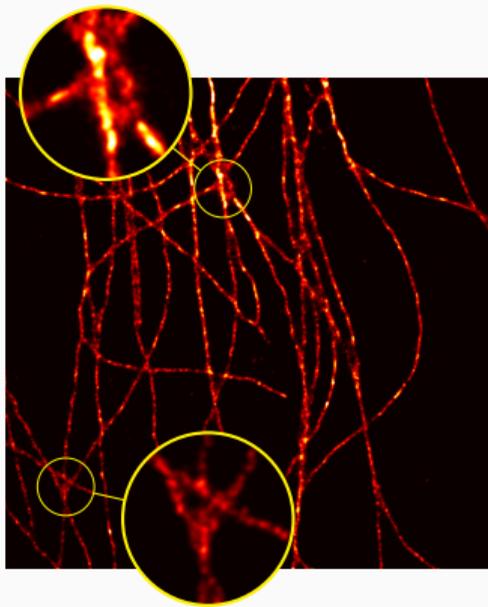
Deep-STORM (E. Nehme et al.)

Problème variationnel sans-grille :  $m \mapsto \|y - \Phi m\|_2^2 + \alpha \|m\|_{TV}$ .

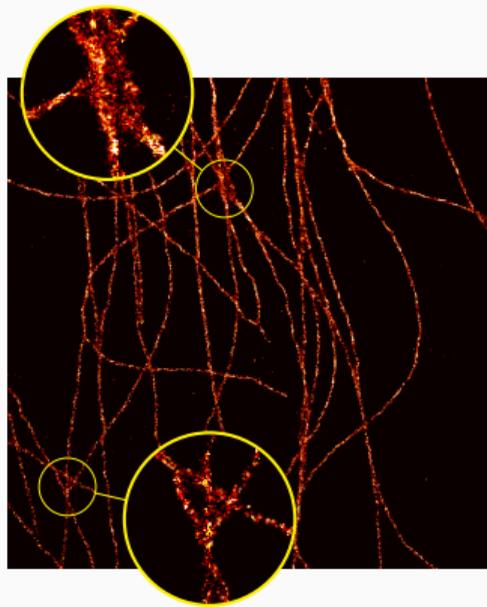
# Résultats de reconstruction



Acquisition



Sans-grille (B. Laville et al.)



Deep-STORM (E. Nehme et al.)

Problème variationnel sans-grille :  $m \mapsto \|y - \Phi m\|_2^2 + \alpha \|m\|_{TV}$ . Peut-on retrouver les courbes avec **une seule** image?

## **Reconstruction de sources courbes**

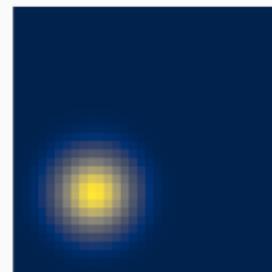
---

Reconstruction sans-grille :

- de points (0D)
- d'ensembles (2D)
- de courbes (1D)

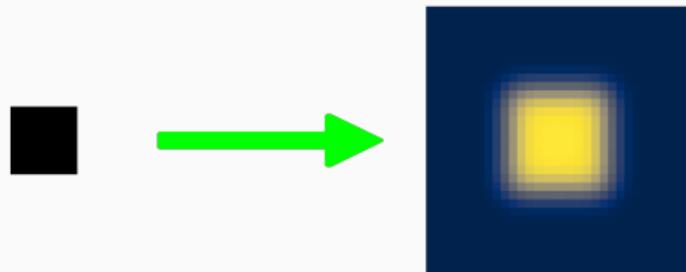
Reconstruction sans-grille :

- de points (0D) ✓
- d'ensembles (2D)
- de courbes (1D)



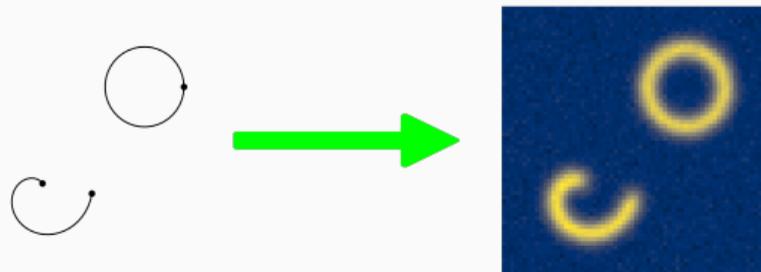
Reconstruction sans-grille :

- de points (0D) ✓
- d'ensembles (2D) ✓
- de courbes (1D)



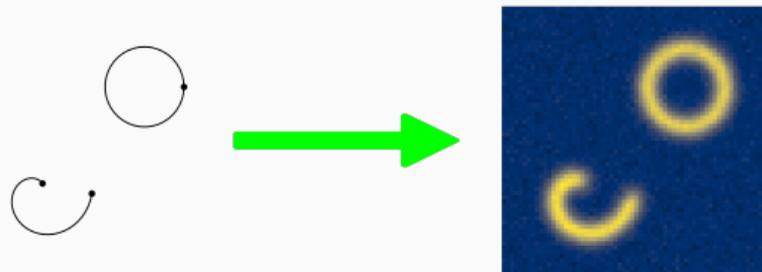
Reconstruction sans-grille :

- de points (0D) ✓
- d'ensembles (2D) ✓
- de courbes (1D) ?



Reconstruction sans-grille :

- de points (0D) ✓
- d'ensembles (2D) ✓
- de courbes (1D) ?



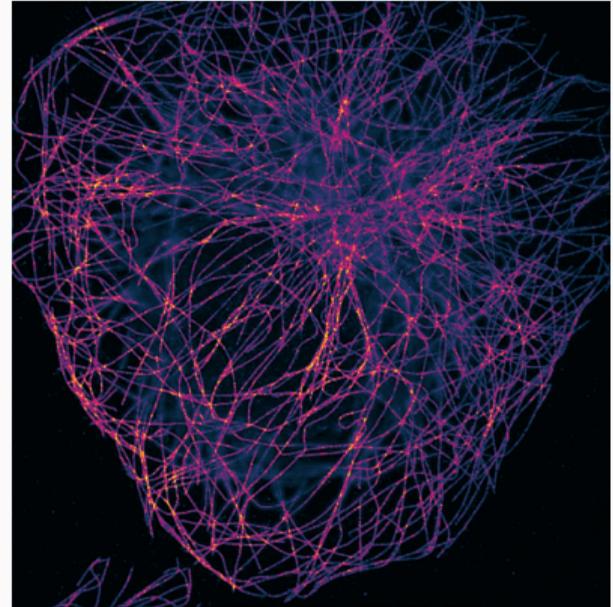
## Problématique

Comment combler ce fossé, autant théorique que pratique, entre 0D et 2D ?

# Applications concrètes

Imagerie biomédicale :

- filaments en microscopie de fluorescence;



Crédit : *EPFL Imaging Group*

## Applications concrètes

Imagerie biomédicale :

- filaments en microscopie de fluorescence;
- structures biologiques;

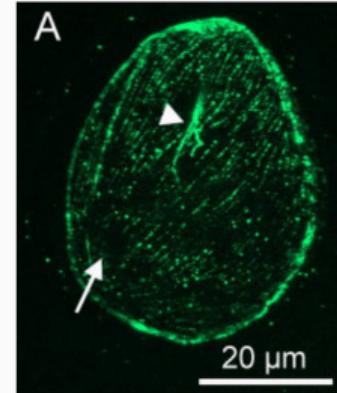


Crédit : J. Staal et al.

# Applications concrètes

Imagerie biomédicale :

- filaments en microscopie de fluorescence;
- structures biologiques;
- collaboration avec l'Institut Méditerranée (Villefranche) sur les algues envahissantes *Ostreopsis*; filaments dans le cytosquelette.



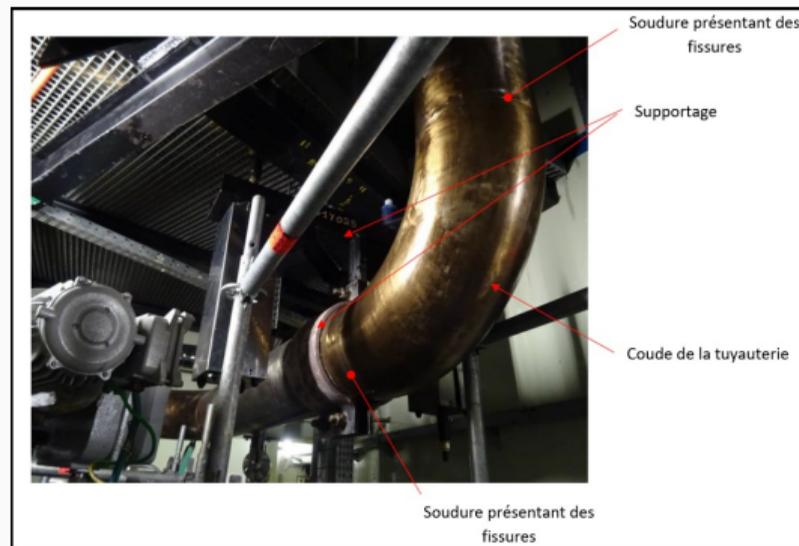
Crédit : Sébastien Schaub (IMEV)

# Applications concrètes

Imagerie biomédicale :

- filaments en microscopie de fluorescence;
- structures biologiques;
- collaboration avec l'Institut Méditerranée (Villefranche) sur les algues envahissantes *Ostreopsis*; filaments dans le cytosquelette.

Détection de fissures : contrôle non destructif d'ouvrages publics, etc.



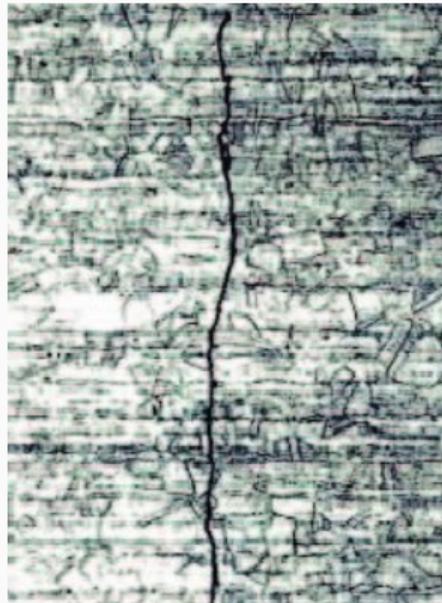
Corrosion sous contraintes inspectée par *ultrasons*. Crédit : EDF

## Applications concrètes

Imagerie biomédicale :

- filaments en microscopie de fluorescence;
- structures biologiques;
- collaboration avec l'Institut Méditerranée (Villefranche) sur les algues envahissantes *Ostreopsis*; filaments dans le cytosquelette.

Détection de fissures : contrôle non destructif d'ouvrages publics, *etc.*



Fissure dans la coupe de tuyauterie. Crédit : Institut Langevin, EDF.



## Mon approche variationnelle : les ingrédients

1. définition d'un nouvel espace d'optimisation sur les **distributions**  $\mathcal{V}$  ;

## Mon approche variationnelle : les ingrédients

1. définition d'un nouvel espace d'optimisation sur les **distributions**  $\mathcal{V}$  ;
2. définition d'une fonctionnelle (CROC) avec un paramètre  $\alpha > 0$  pour  $m \in \mathcal{V}$  :

$$F(m) = \underbrace{\|y - \Phi m\|_2^2}_{\text{attache aux données}} + \alpha \underbrace{(\|m\|_{TV^2} + \|\operatorname{div} m\|_{TV})}_{\text{nouveau régulariseur}} \quad (\text{CROC})$$

## Mon approche variationnelle : les ingrédients

1. définition d'un nouvel espace d'optimisation sur les **distributions**  $\mathcal{V}$  ;
2. définition d'une fonctionnelle (CROC) avec un paramètre  $\alpha > 0$  pour  $m \in \mathcal{V}$  :

$$F(m) = \underbrace{\|y - \Phi m\|_2^2}_{\text{attache aux données}} + \alpha \underbrace{(\|m\|_{TV^2} + \|\operatorname{div} m\|_{TV})}_{\text{nouveau régulariseur}} \quad (\text{CROC})$$

si  $m$  est une courbe,  $\|m\|_{TV^2} + \|\operatorname{div} m\|_{TV} \approx$  longueur + comptage des courbes

## Mon approche variationnelle : les ingrédients

1. définition d'un nouvel espace d'optimisation sur les **distributions**  $\mathcal{V}$  ;
2. définition d'une fonctionnelle (CROC) avec un paramètre  $\alpha > 0$  pour  $m \in \mathcal{V}$  :

$$F(m) = \underbrace{\|y - \Phi m\|_2^2}_{\text{attache aux données}} + \alpha \underbrace{(\|m\|_{TV^2} + \|\operatorname{div} m\|_{TV})}_{\text{nouveau régulariseur}} \quad (\text{CROC})$$

si  $m$  est une courbe,  $\|m\|_{TV^2} + \|\operatorname{div} m\|_{TV} \approx$  longueur + comptage des courbes

3. théorème : le *minimum* de CROC est composé d'un nombre **fini** de courbes que l'on sait estimer.

## Mon approche variationnelle : les ingrédients

1. définition d'un nouvel espace d'optimisation sur les **distributions**  $\mathcal{V}$  ;
2. définition d'une fonctionnelle (CROC) avec un paramètre  $\alpha > 0$  pour  $m \in \mathcal{V}$  :

$$F(m) = \underbrace{\|y - \Phi m\|_2^2}_{\text{attache aux données}} + \alpha \underbrace{(\|m\|_{TV^2} + \|\operatorname{div} m\|_{TV})}_{\text{nouveau régulariseur}} \quad (\text{CROC})$$

si  $m$  est une courbe,  $\|m\|_{TV^2} + \|\operatorname{div} m\|_{TV} \approx$  longueur + comptage des courbes

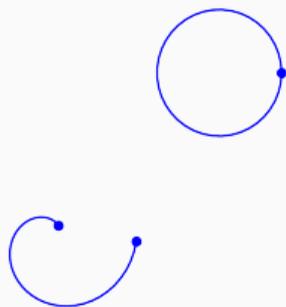
3. théorème : le *minimum* de CROC est composé d'un nombre **fini** de courbes que l'on sait estimer.

### Prépublication (2<sup>nd</sup> tour de relecture)

« *Off-the-grid curve reconstruction through divergence regularisation : an extreme point result* ». B. Laville, L. Blanc-Féraud, G. Aubert, avril 2022.

## Publication en rédaction

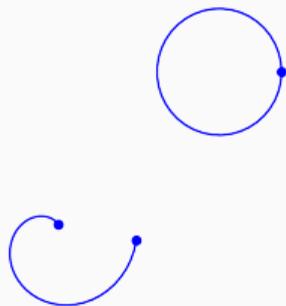
« *A greedy approach for off-the-grid curve reconstruction* ». B. Laville, L. Blanc-Féraud, G. Aubert, octobre 2022.



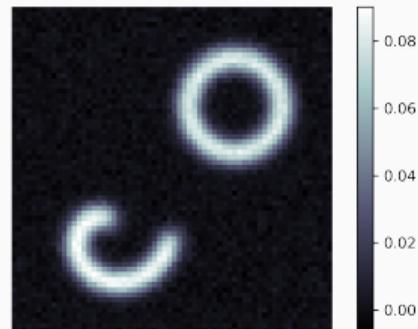
Sources

## Publication en rédaction

« *A greedy approach for off-the-grid curve reconstruction* ». B. Laville, L. Blanc-Féraud, G. Aubert, octobre 2022.

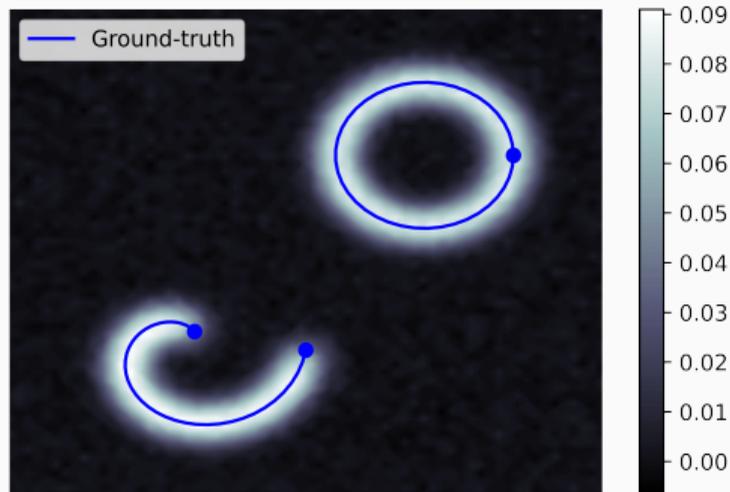


Sources



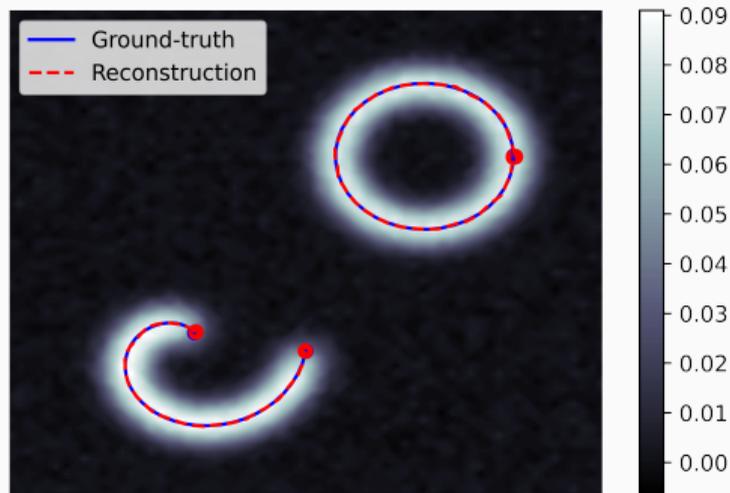
Acquisition synthétique

# Premiers résultats numériques



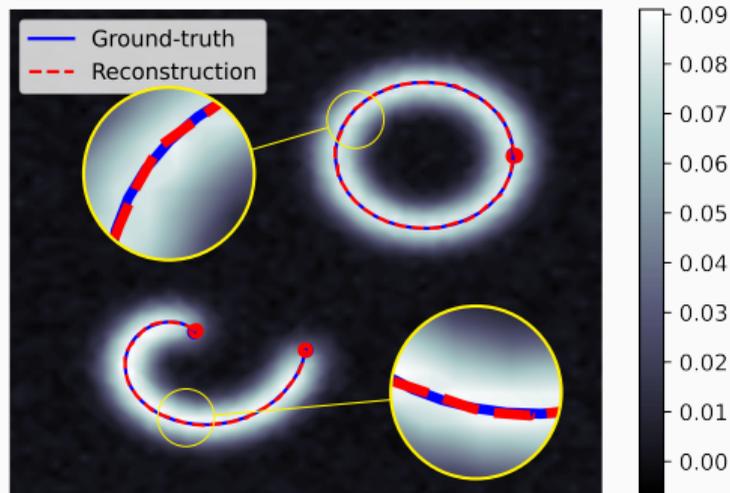
Acquisition et sources

# Premiers résultats numériques



Reconstruction proposée

# Premiers résultats numériques



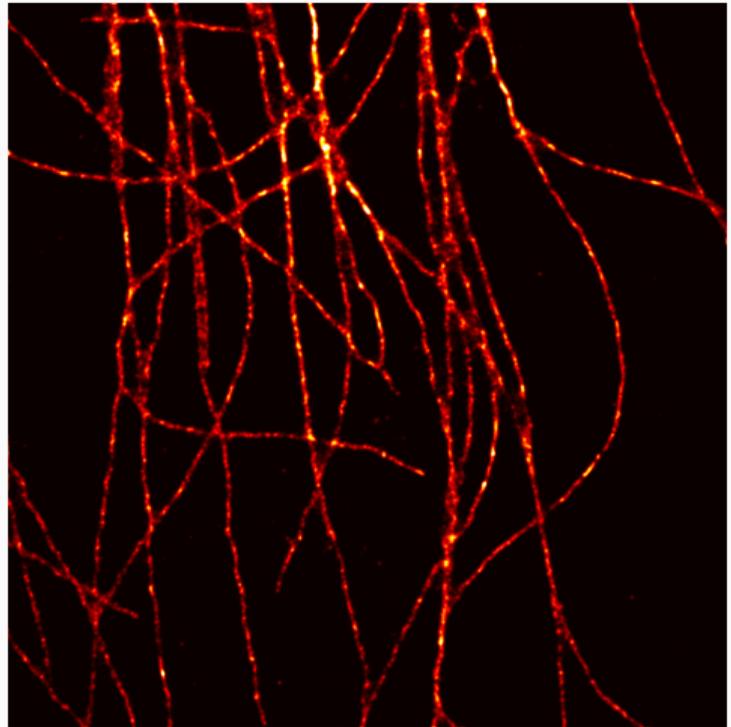
Reconstruction proposée

## **Récapitulatif et perspectives**

---

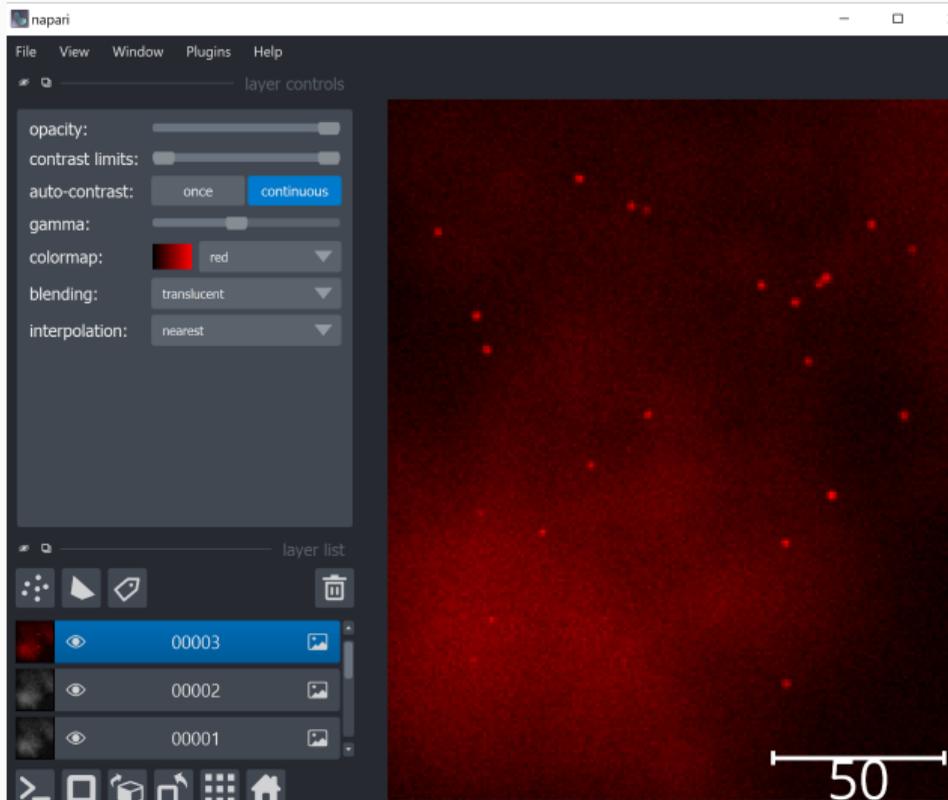
# Récapitulatif

- état de l'art sur la reconstruction sans-grille de points;



# Récapitulatif

- état de l'art sur la reconstruction sans-grille de points;
- logiciel à destination d'un public biologiste/médecins;

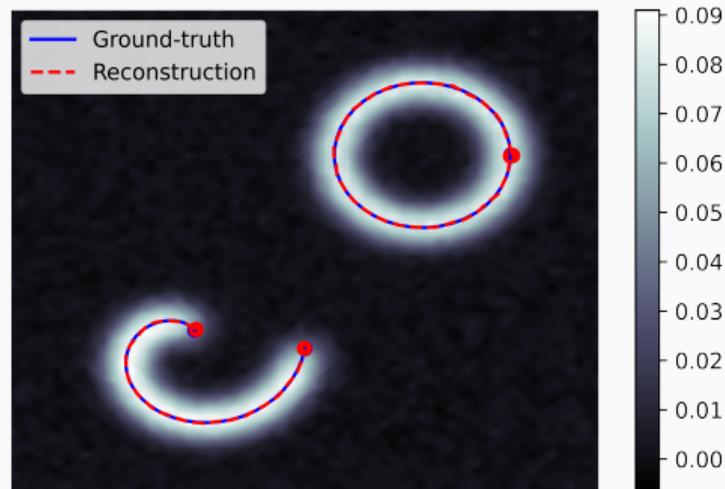


- état de l'art sur la reconstruction sans-grille de points;
- logiciel à destination d'un public biologiste/médecins;
- formulation sans-grille d'un problème de fluctuation en microscopie;

The screenshot shows the IEEE Xplore interface. At the top, there is a navigation bar with 'IEEE Xplore' logo, 'Browse', 'My Settings', and 'Help' menus, and an 'Institutional' button. Below this is a search bar with 'All' selected. The main content area shows the breadcrumb 'Conferences > ICASSP 2022 - 2022 IEEE Inter...' followed by the article title 'Off-The-Grid Covariance-Based Super-Resolution Fluctuation Microscopy'. The publisher is listed as 'IEEE'. There are buttons for 'Cite This' and 'PDF'. The authors are 'Bastien Laville ; Laure Blanc-Féraud ; Gilles Aubert' with a link to 'All Authors'. A blue box on the left indicates '92 Full Text Views'. On the right, there are icons for 'R' (Registered), a share icon, 'C' (Creative Commons), and a folder icon.

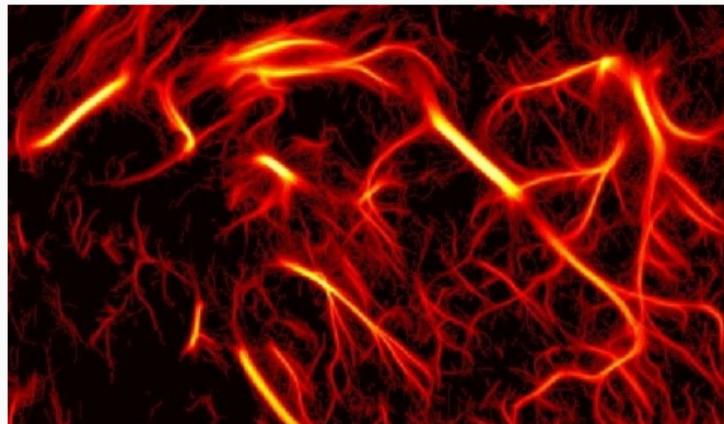
# Récapitulatif

- état de l'art sur la reconstruction sans-grille de points;
- logiciel à destination d'un public biologiste/médecins;
- formulation sans-grille d'un problème de fluctuation en microscopie;
- nouvelle approche originale sans-grille : reconstruction de courbes.



Crédit : Laville et al.

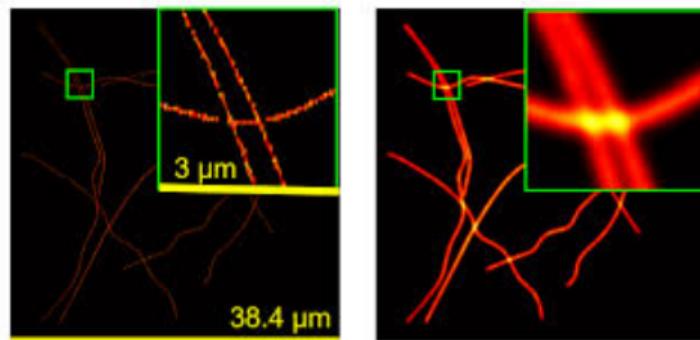
- reconstruire de courbes sur des échantillons biologiques;



Crédit : Institut Langevin.

- reconstruire de courbes sur des échantillons biologiques;
- étoffer et promouvoir mon logiciel;

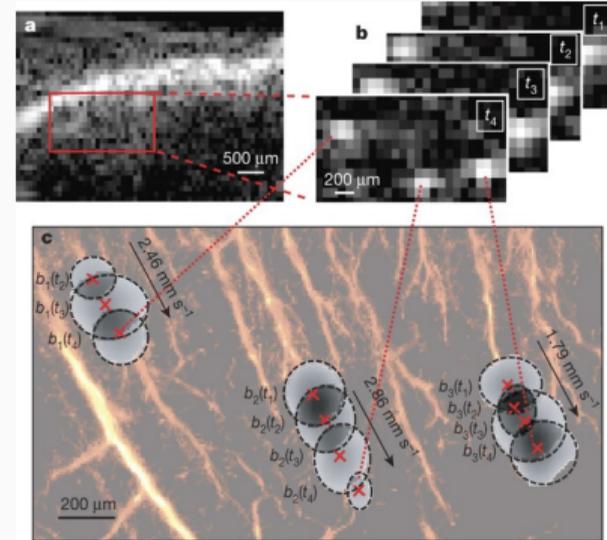
- reconstruire de courbes sur des échantillons biologiques;
- étoffer et promouvoir mon logiciel;
- étudier l'intérêt d'une approche croisée IA/sans-grille (algorithme déroulant);



Crédit : Ben Sahel et al.

# Perspectives

- reconstruire de courbes sur des échantillons biologiques;
- étoffer et promouvoir mon logiciel;
- étudier l'intérêt d'une approche croisée IA/sans-grille (algorithme déroulant);
- reconstruction *dynamique* de points, courbes temporelles. Application : localisation par microscopie d'ultrasons.



Crédit : Errico et al.

## Publications durant le doctorat

### Publications :

- « *Off-the-grid variational sparse spike recovery : methods and algorithms* ». Bastien Laville, Laure Blanc-Féraud, Gilles Aubert. **Journal of Imaging**, Volume 7–12, décembre 2021.
- « *Off-the-grid covariance-based super-resolution microscopy* ». Bastien Laville, Laure Blanc-Féraud, Gilles Aubert. **Conférence internationale** IEEE ICASSP mai 2022.
- « *Super-résolution sans-grille pour l'imagerie de fluctuation* ». Bastien Laville, Laure Blanc-Féraud, Gilles Aubert. **Conférence nationale** GRETSI septembre 2022.

### Prépublications :

- « *Off-the-grid curve reconstruction through divergence regularisation : an extreme point result* ». Bastien Laville, Laure Blanc-Féraud, Gilles Aubert. Prépublication avril 2022.
- « *A greedy approach for off-the-grid curve reconstruction* ». Bastien Laville, Laure Blanc-Féraud, Gilles Aubert.

**Articles et présentations en congrès sur**  
**<https://www-sop.inria.fr/members/Bastien.Laville/>**

