

Tractographie Cardiaque Optimale par IRM du Tenseur de Diffusion

Soutenance de thèse

Matthew Ozon

Directeurs : Marc Robini et Yue Min Zhu

École doctorale : Électronique, Électrotechnique et Automatique.



Tutelles :



Creatis



Tractographie Cardiaque Optimale par IRM du Tenseur de Diffusion

Soutenance de thèse

Matthew Ozon

Directeurs : Marc Robini et Yue Min Zhu

École doctorale : Électronique, Électrotechnique et Automatique.



Supports supplémentaires



Plan de l'exposé

1. Introduction
 - 1.1. Contexte
 - 1.2. L'outil tractographie
 - 1.3. La fibre : une notion floue
 - 1.4. Point historique
2. Contributions
 - 2.1. Chaine de traitement et formulation
 - 2.2. Tractographie rigide
 - 2.3. Graphe élastique : vibration des nœuds
 - 2.4. Classification de l'information des fibres : fibres multi-échelles
3. Conclusions et perspectives

Contexte

Contexte

Imagerie de Tenseur de Diffusion

Tractographie globale

Architecture cardiaque : fibres

Motivations du travail

Extraction de fibres fiable et robuste à partir de données cardiaques humaines et quantification des résultats

Résolution des problèmes

Tractographie → minimisation globale d'énergie

Caractérisation des résultats → mesures basées sur l'observation expérimentale

Tractographie : un outils de description

Description du cœur

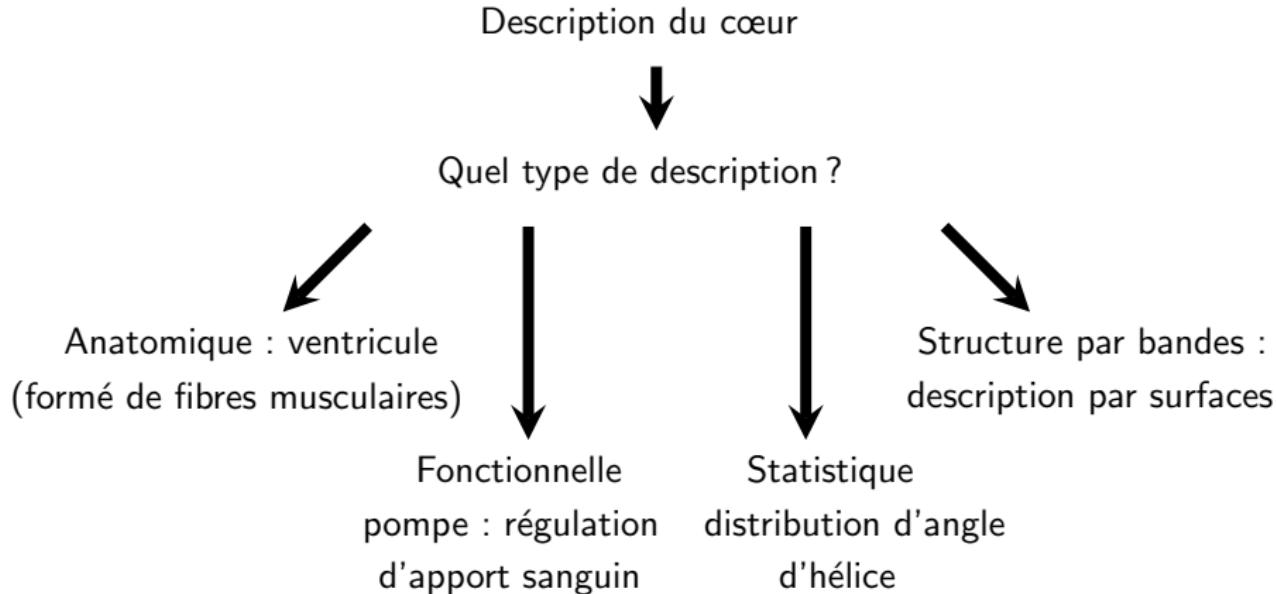
Tractographie : un outils de description

Description du cœur



Quel type de description ?

Tractographie : un outils de description

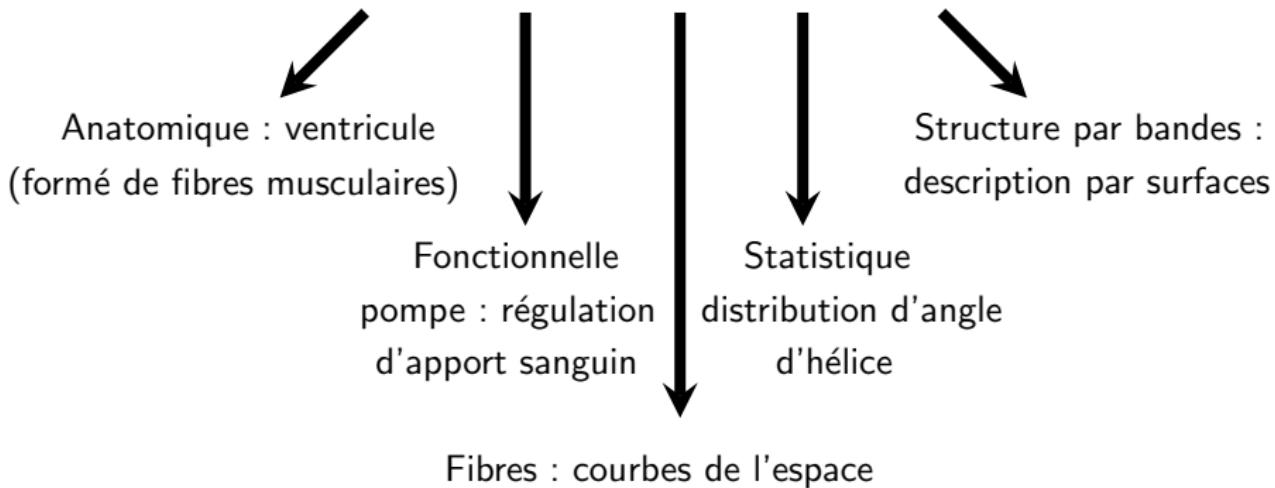


Tractographie : un outils de description

Description du cœur



Quel type de description ?



Les fibres c'est quoi ?

Définition du dictionnaire

Fibre : élément d'aspect filamenteux qui constitue certains tissus

Les fibres c'est quoi ?

Définition du dictionnaire

Fibre : élément d'aspect filamenteux qui constitue certains tissus

ambiguïté

Physique

Combinaison de protéines allongées (actine, myosine, titine...)

Biologique

Myocyte ou amas de myocyte dans une matrice de collagène : fibre musculaire

Anatomique

Ensemble cohérent linéaire de fibres musculaires définissant le mouvement

Les fibres c'est quoi ?

Définition du dictionnaire

Fibre : élément d'aspect filamenteux qui constitue certains tissus

ambiguïté

Physique

Combinaison de protéines allongées (actine, myosine, titine...)

Biologique

Myocyte ou amas de myocyte dans une matrice de collagène : fibre musculaire

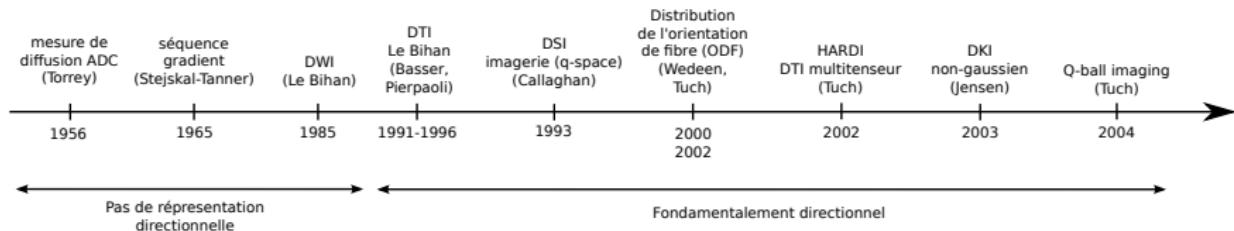
Anatomique

Ensemble cohérent linéaire de fibres musculaires définissant le mouvement

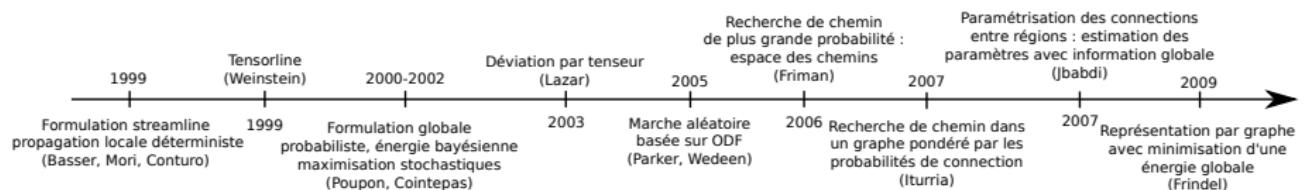
La notion d'échelle de modélisation apparaît

Évolution des idées

Modèle



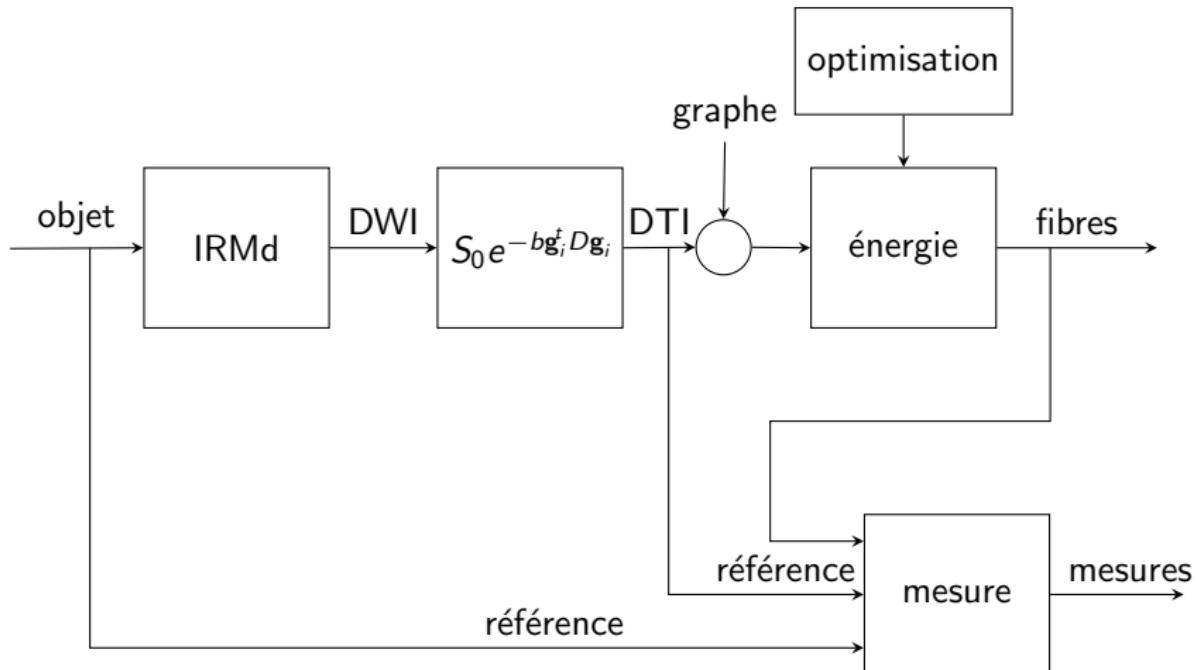
Tractographie



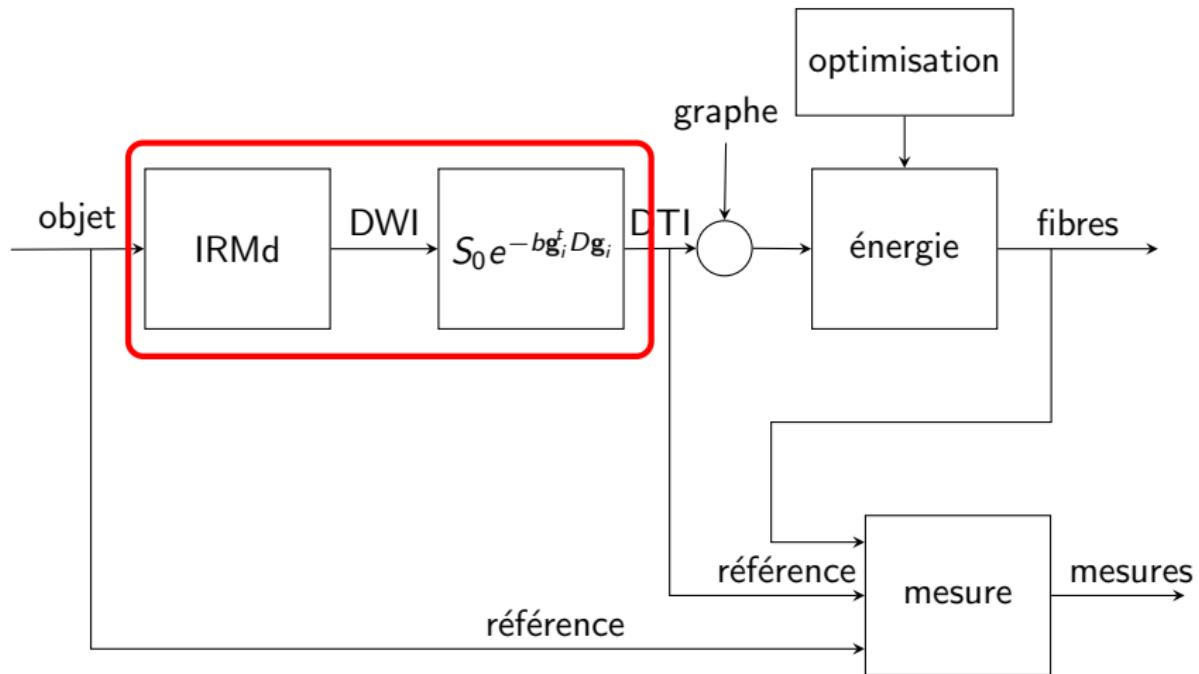
Plan de l'exposé

1. Introduction
 - 1.1. Contexte
 - 1.2. L'outil tractographie
 - 1.3. La fibre : une notion floue
 - 1.4. Point historique
2. Contributions
 - 2.1. Chaine de traitement et formulation
 - 2.2. Tractographie rigide
 - 2.3. Graphe élastique : vibration des nœuds
 - 2.4. Classification de l'information des fibres : fibres multi-échelles
3. Conclusions et perspectives

Tractographie par graphe



Données de diffusion



Données de diffusion

IRM de diffusion et modélisation par tenseur

Hypothèse : modélisation par tenseur (D) de diffusion.

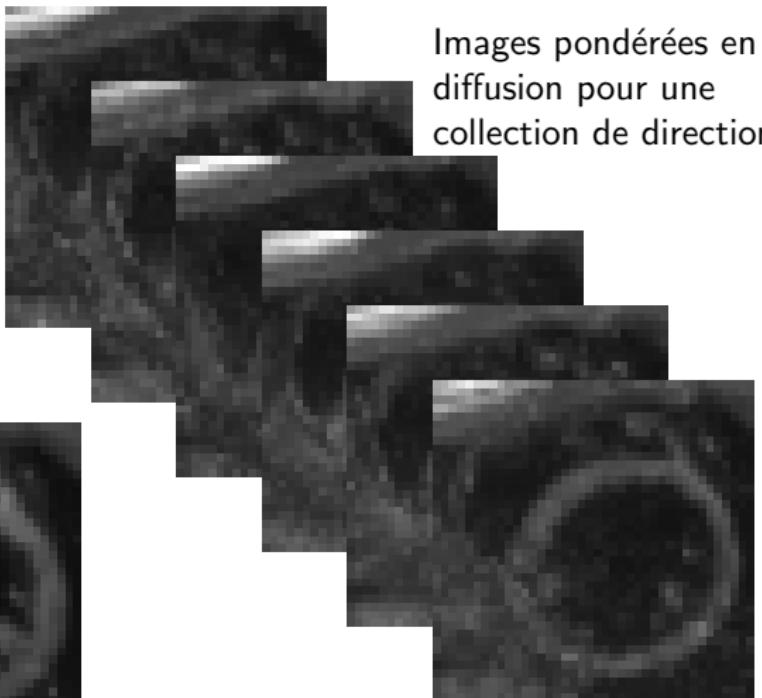
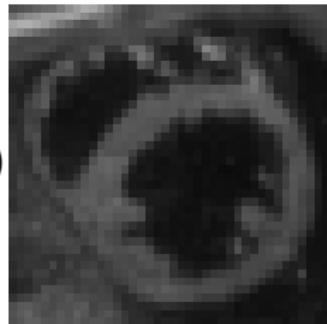
$$S_i = S_0 e^{-bg_i^T D g_i}$$

g_i direction de gradient

b valeur de b

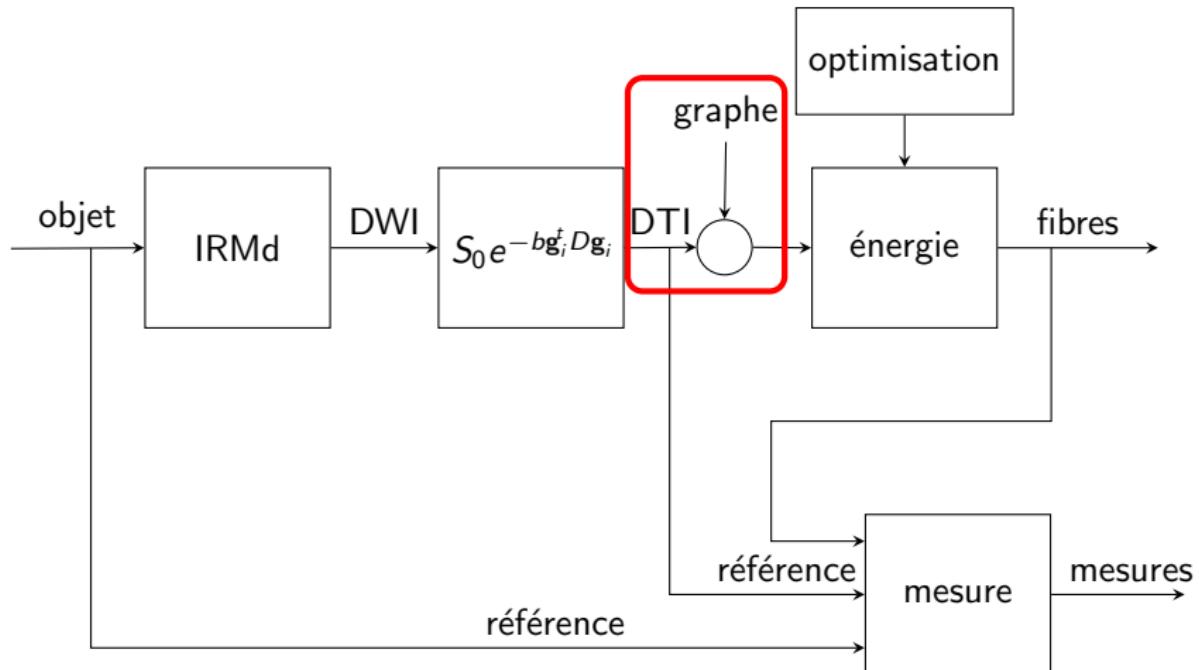
S_i signal de diffusion

Image sans diffusion ($b = 0$)



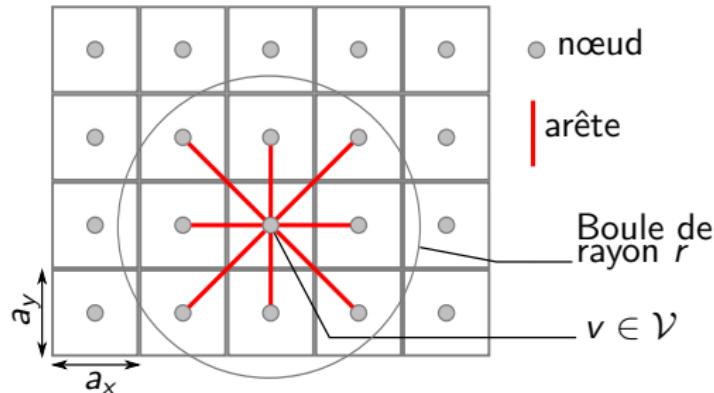
Images pondérées en diffusion pour une collection de directions

Représentation par graphe des données



Représentation par graphe des données

Le graphe \mathcal{G} est défini par la paire d'ensembles des nœuds \mathcal{V} et des arêtes \mathcal{E}

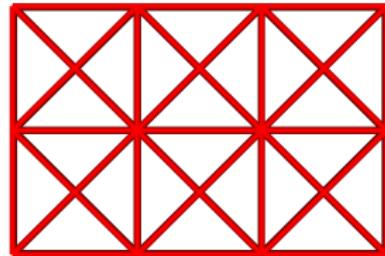
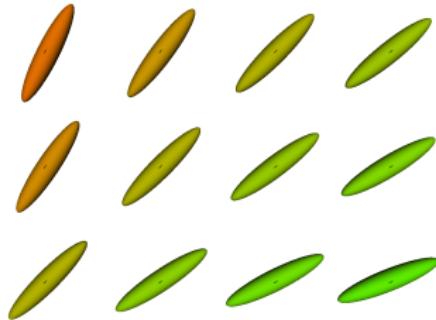


On associe G à un ensemble de configuration formé par le produit Cartésien $\Omega \times \mathcal{X}$ des poids des arêtes et des positions des nœuds :

$$\Omega = \{\omega_e \in \{0, 1\} \mid e \in E\} \text{ et } \mathcal{X} = \{\mathcal{X}_v \subset \frac{a_x}{K} \mathbb{Z} \times \frac{a_y}{K} \mathbb{Z} \times \frac{a_z}{K} \mathbb{Z} \mid v \in V\}$$

Représentation par graphe des données

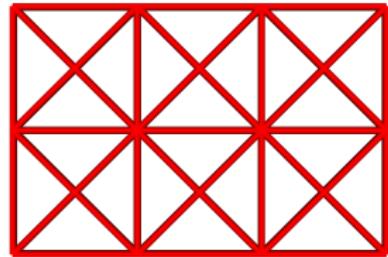
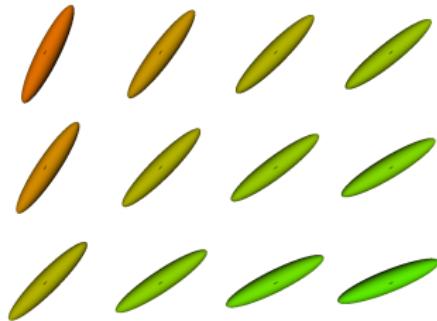
Champ de tenseurs



Graphe

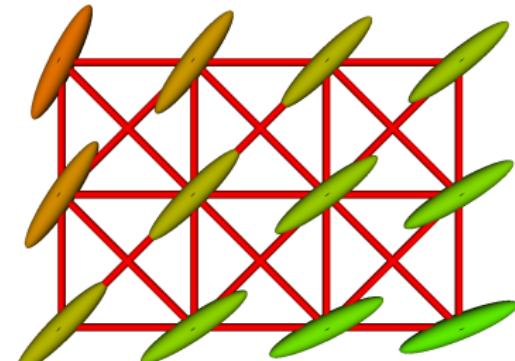
Représentation par graphe des données

Champ de tenseurs

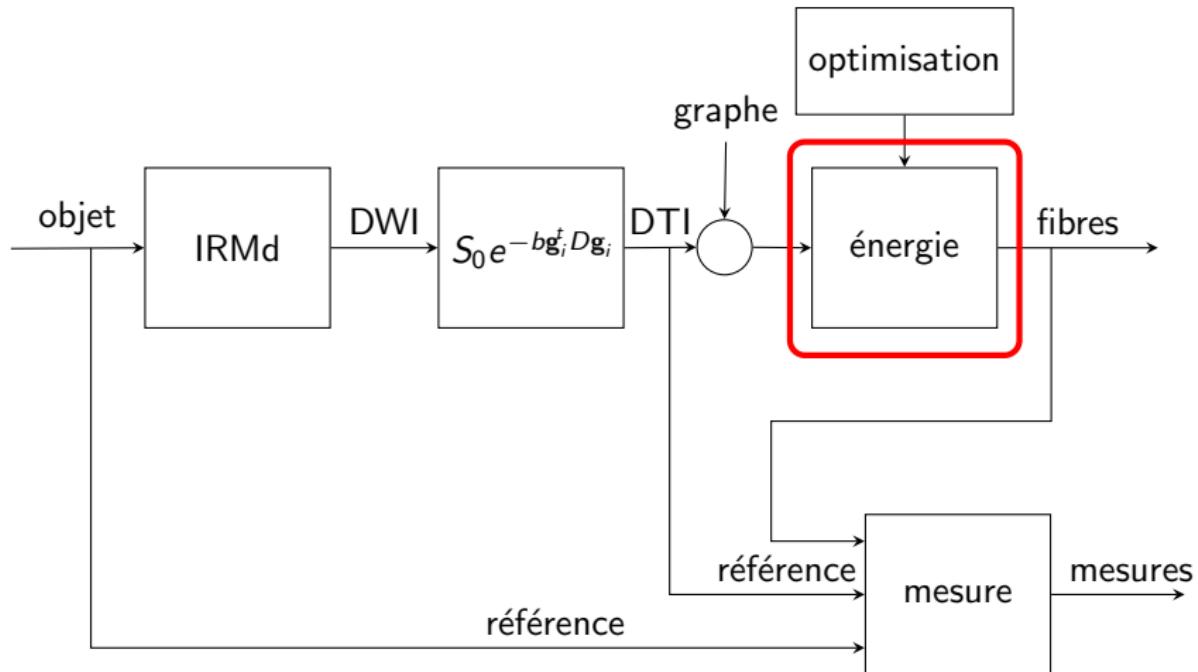


Graphe

Représentation par graphe



Formulation de l'énergie



Formulation de l'énergie

Formalisme global

Soit un graphe $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ et son état associé $(\omega, \mathbf{x}) \in \Omega \times \mathcal{X}$. L'énergie \tilde{U} est une somme de trois termes :

$$\tilde{U}(\omega, \mathbf{x}) = \sum_{v \in \mathcal{V}} \left(\underbrace{\tilde{U}_0(v, \omega, \mathbf{x}_v)}_{\text{attaché aux données}} + \underbrace{\alpha \tilde{U}_1(v, \omega) + \beta \tilde{U}_2(v, \omega, \mathbf{x}_v)}_{\text{a priori}} \right)$$

et la tractographie revient à résoudre le problème suivant :

$$\alpha, \beta \in \mathbb{R}^+, \quad (\hat{\omega}, \hat{\mathbf{x}}) \in \arg \min_{(\omega, \mathbf{x}) \in \Omega \times \mathcal{X}} \tilde{U}(\omega, \mathbf{x})$$

Formulation de l'énergie

Attache aux données

Pour un nœud $v \in \mathcal{V}$ avec $Z_v(\omega)$ paires d'arêtes connectées,

$$\tilde{U}_0(v, \omega, \mathbf{x}_v) = \begin{cases} \frac{-1}{Z_v(\omega)} \sum_{\{v_k, v_l\} \subset \mathcal{N}_v(\mathcal{V})} \omega(e_k)\omega(e_l)F(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l) & \text{si } Z_v(\omega) \geq 1, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

F décrit l'adéquation entre une arête et les données :

$$F(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l) = \frac{1}{\|\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_k\|} \int_0^1 |\langle FA(\tau(t))v_{\lambda_1}(\tau(t)), \mathbf{x}_l - \mathbf{x}_k \rangle| dt$$

$\tau(t)$: paramétrage du segment entre \mathbf{x}_k et \mathbf{x}_l

Formulation de l'énergie

A priori

Deux termes complémentaires qui ne s'expriment que conditionnellement au nombre d'arêtes connectées d_v .

Densité

$$\tilde{U}_1(v, \omega) = \begin{cases} 1/2 & \text{si } d_v \leqslant 1, \\ 0 & \text{si } d_v = 2, \\ d_v & \text{si } d_v \geqslant 3, \end{cases}$$

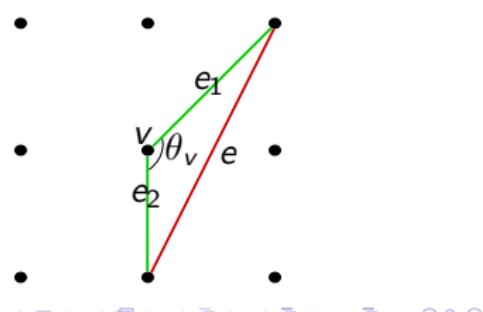
Favorise une paire connectée par nœud.

$$d_v = \sum_{v' \in \mathcal{N}_v(\mathcal{V})} \omega(\{v, v'\})$$

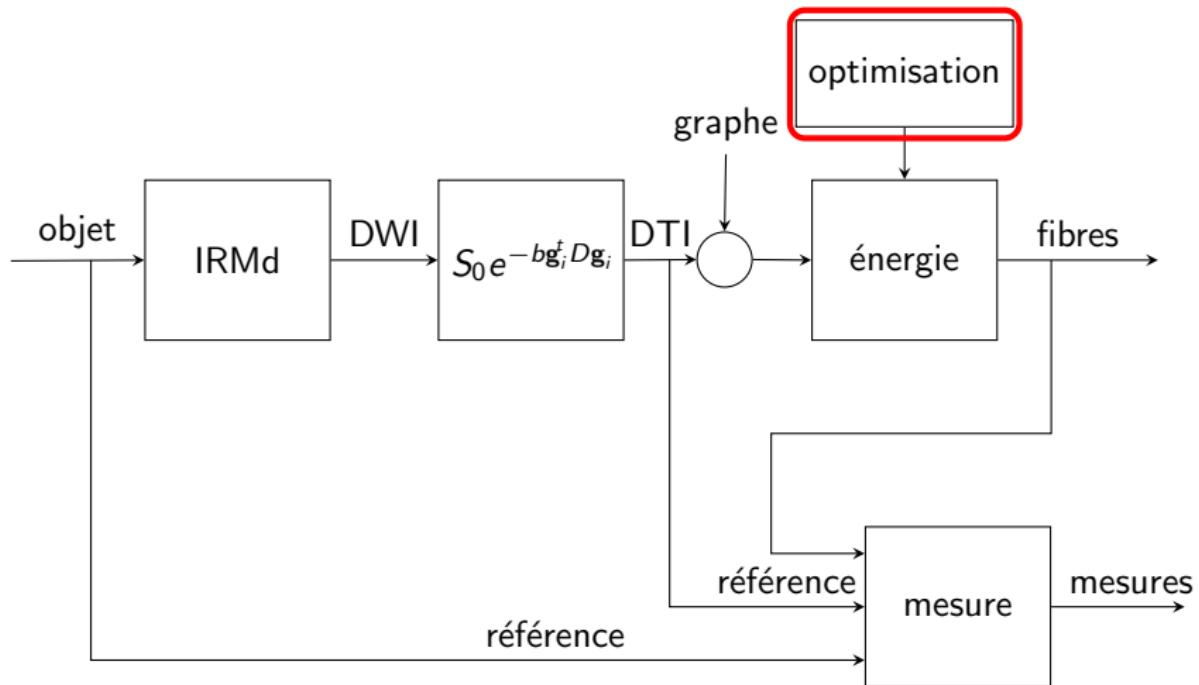
Courbure

$$\tilde{U}_2(v, \omega, \mathbf{x}_v) = \begin{cases} 0 & \text{si } d_v \neq 2, \\ \frac{1}{1+e^{\frac{\theta(v)-\pi/2}{\sigma}}} & \text{sinon} \end{cases}$$

Favorise les paires connectées alignées.



Méthode de minimisation globale



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reboot simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} **faire**

 nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ **alors**

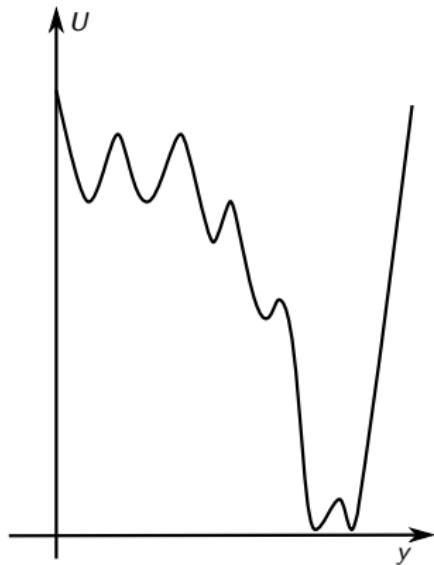
$y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

$y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reboot simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} faire

nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ alors

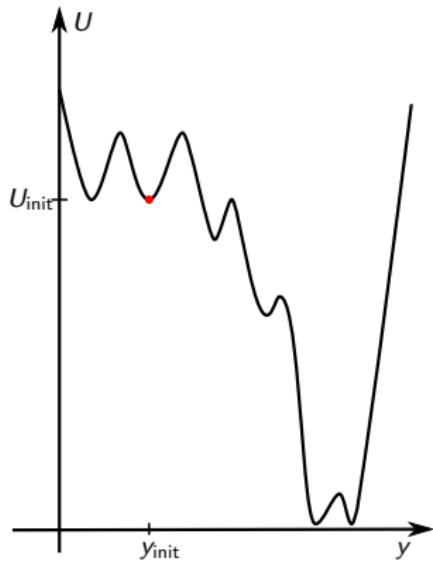
 | $y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

 | $y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reboot simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} **faire**

nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ **alors**

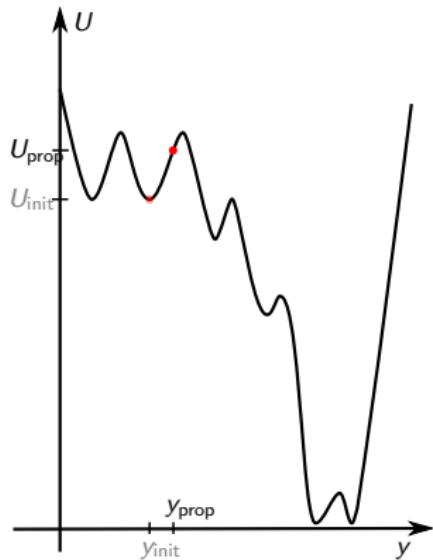
| $y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

| $y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reçut simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} **faire**

 nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ **alors**

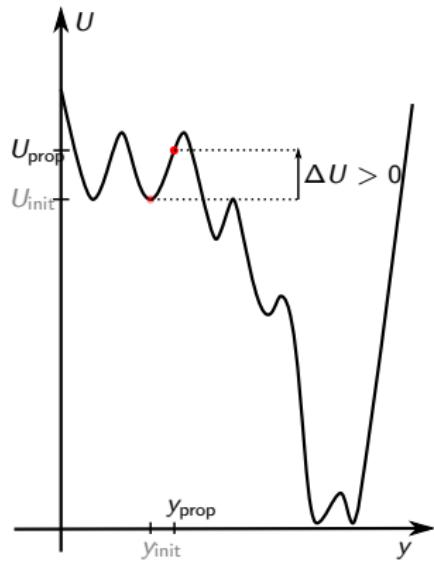
$y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

$y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reboot simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} **faire**

 nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ **alors**

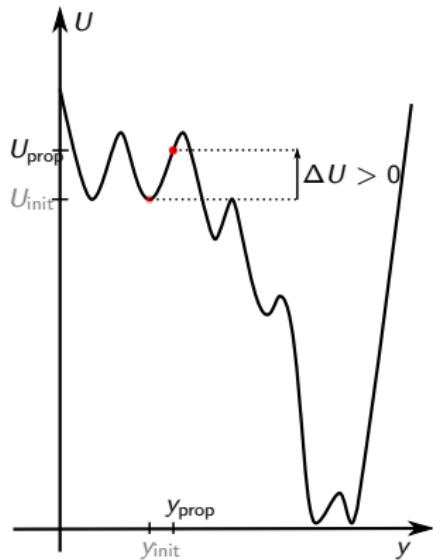
$y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

$y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reboot simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} **faire**

nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ alors

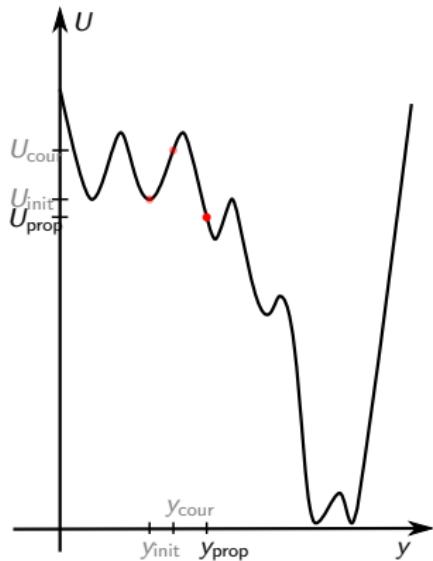
| $y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

| $y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reboot simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} **faire**

 nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ **alors**

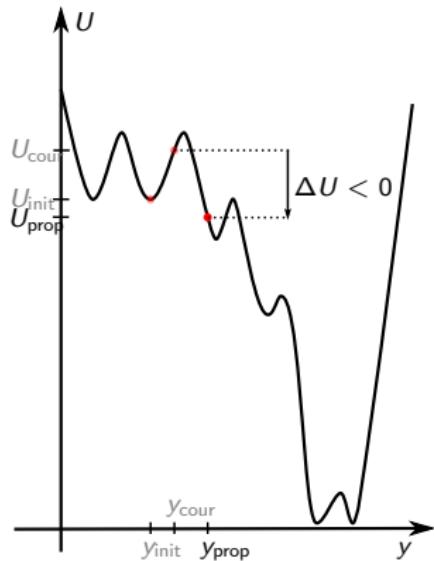
$y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

$y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin



Méthode de minimisation globale

Optimisation stochastique :
Reboot simulé généralisé

Tirage aléatoire de l'état initial $y^{(0)} \in \Omega \times \mathcal{X}$

pour $n=1$ to N_{iter} **faire**

 nouvel état ρ proposé selon $q_{T_n}(y^{(n-1)}, \bullet)$

$y^{(n)} \leftarrow y^{(n-1)}$

$\Delta U \leftarrow U_{T_n}(\rho) - U_{T_n}(y^{(n-1)})$

si $\Delta U \leq 0$ **alors**

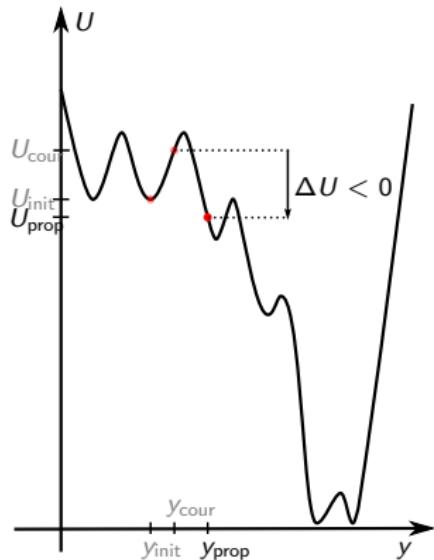
$y^{(n)} \leftarrow \rho$

sinon

$y^{(n)} \leftarrow \rho$ avec la probabilité $e^{-\frac{\Delta U}{T_n}}$

fin

fin

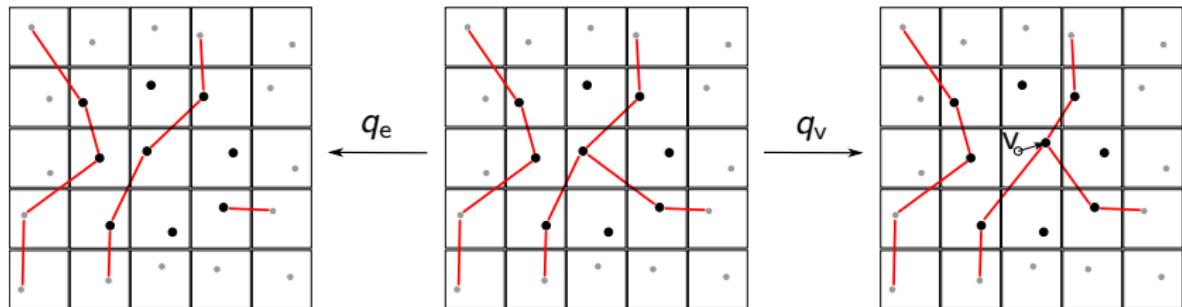


Méthode de minimisation globale

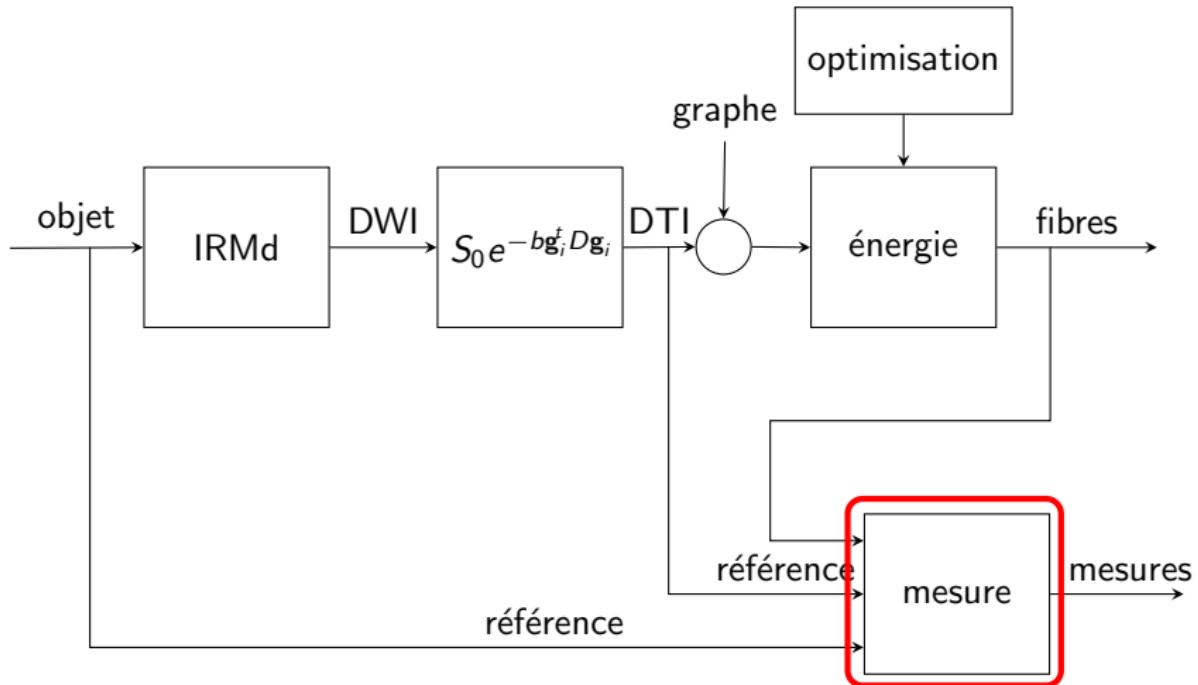
La proposition des nouveaux états se décompose en deux parties, un mécanisme (q_e) agissant sur Ω et l'autre (q_v) sur \mathcal{X} ce qui permet d'explorer tout l'espace des états. Le mécanisme final q_T est un mélange des mécanismes de base :

$$q_T = (1 - \zeta(T)) q_e + \zeta(T) q_v$$

avec $\zeta(T)$ la probabilité de q_v



Mesures

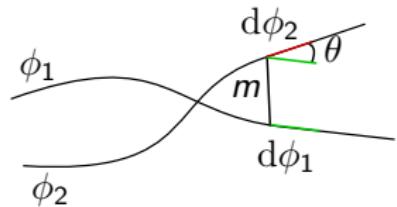


Mesures

Similarité

On définit une mesure de similarité globale entre les fibres ϕ_1 et ϕ_2 comme :

$$\mu_{\text{sim}}(\phi_1, \phi_2) = m(\phi_1, \phi_2) \sin(\theta(\phi_1, \phi_2))$$



et la déviation angulaire comme :

$$\overline{\sin(\theta)} = \sin(\overline{\theta(\phi_1, \phi_2)})$$

Tractographie rigide

Modèle rigide :

les positions des nœuds sont fixes (au centre de chaque voxel)

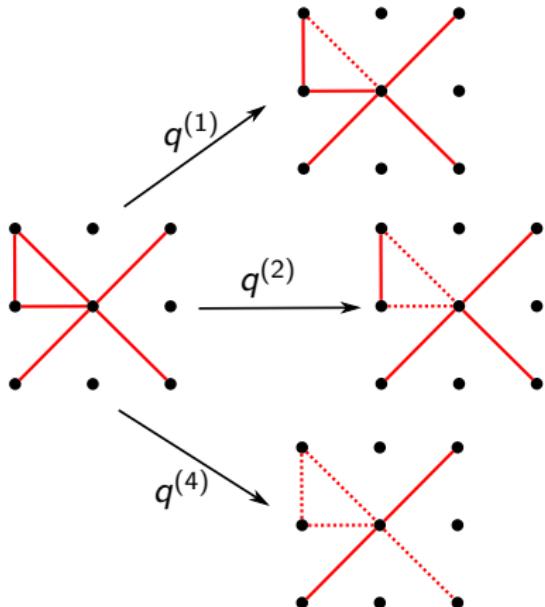
le mécanisme de communication n'implique que des mouvements d'arêtes, q_e , et
 $\zeta(T) = 0$

implications :

- 1 restriction de l'espace au poids des arêtes Ω
- 2 discrétisation grossière des fibres (besoin de post-traitement)

Tractographie rigide

Mécanismes de communication élémentaires sur les arêtes



Mécanismes utilisés pour l'optimisation

$$(*) q(T) = q^{(1)}$$

mouvement atomique ($SA^{(1)}$)

$$(*) q(T) = \kappa_1(T)q^{(1)} + (1 - \kappa_1(T))q^{(2)}$$

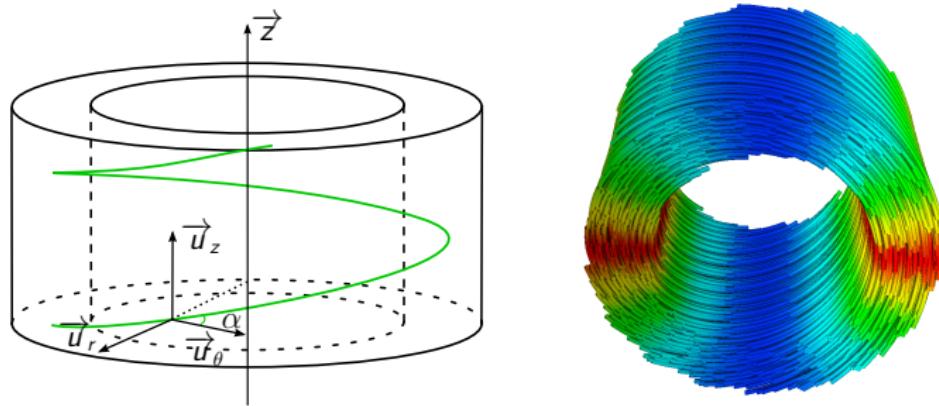
mélange une et deux arêtes ($SC^{(1,2)}$)

$$(*) q(T) = \kappa_1(T)q^{(1)} + \kappa_2(T)q^{(2)} + \kappa_4(T)q^{(4)}$$

mélange une, deux et chaîne d'arêtes ($SC^{(1,2,4)}$)

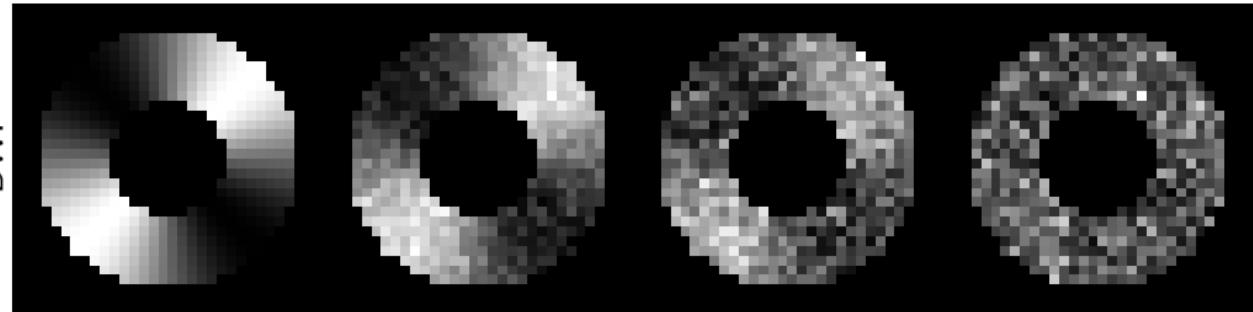
Données synthétiques

Modèle numérique élémentaire



Données synthétiques

Simulation des données pondérées en diffusion



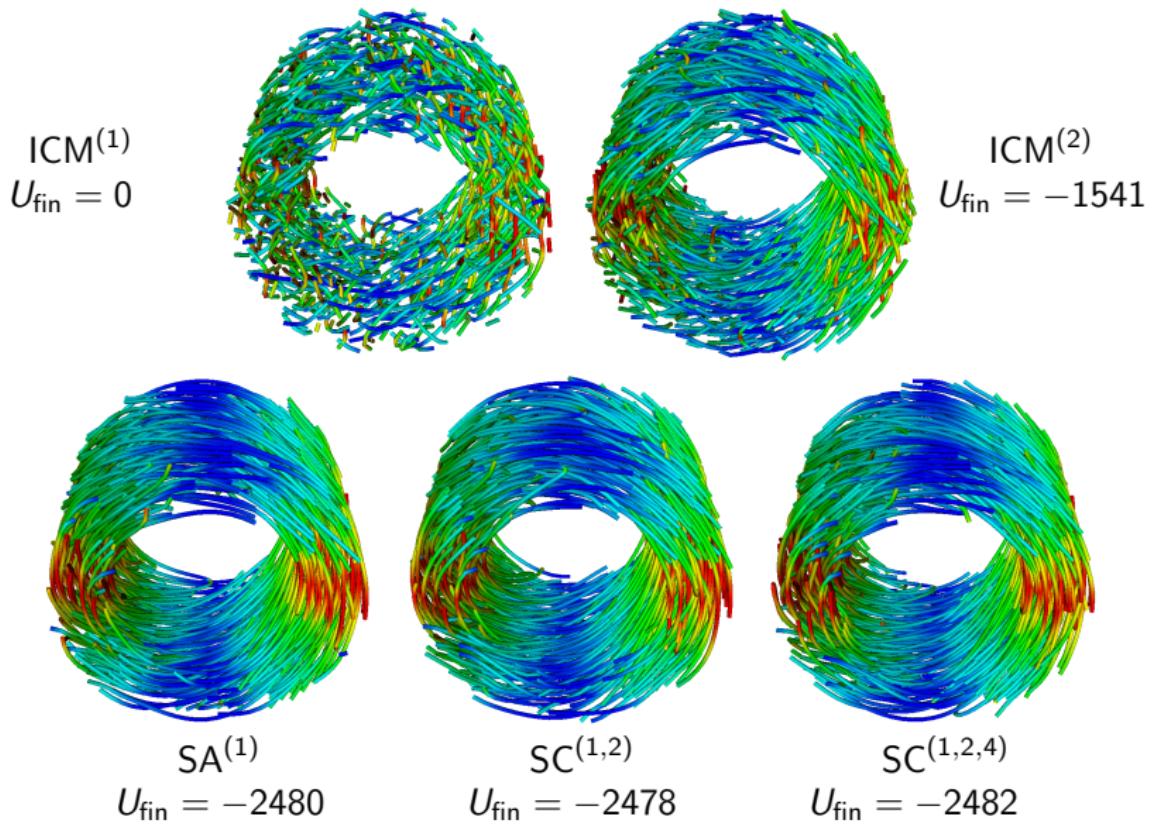
SNR ∞ [dB]

25 [dB]

15 [dB]

0 [dB]

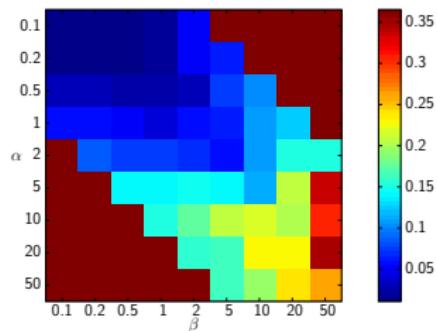
Choix de l'optimisation



Choix des paramètres du modèle

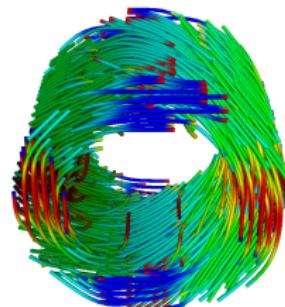
Échantillonnage de l'espace des paramètres
sélection basée sur la mesure de similarité

μ_{sim}

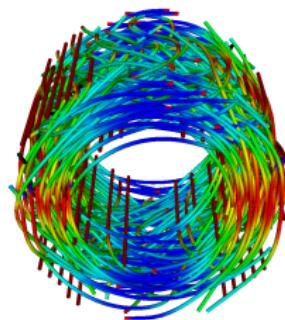
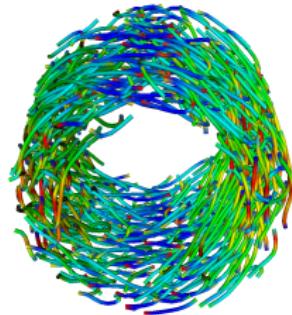


α sur évalué : $(\alpha, \beta) = (1, 0.5)$

β sur évalué : $(\alpha, \beta) = (0.2, 2)$



α et β sur évalués : $(\alpha, \beta) = (20, 50.0)$



Formulation de \mathcal{A}^*

Résumé de l'algorithme de tractographie rigide : \mathcal{A}^*

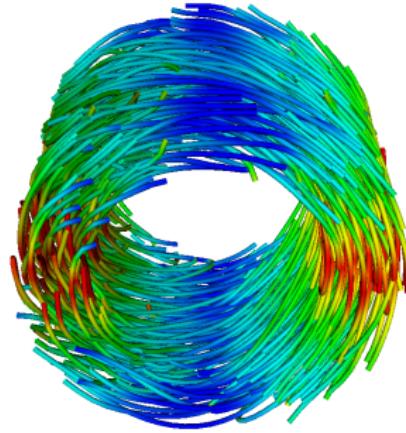
Utilisation des paramètres optimaux :

$$(\alpha, \beta) = (0.2, 0.5)$$

Optimisation par la méthode :

$$SC^{(1,2,4)}$$

Rappel du résultat de la tractographie par \mathcal{A}^*



Robustesse au bruit d'acquisition

Comparaison des performances de \mathcal{A}^* avec d'autres méthodes :

\mathcal{A}_{FACT} [Mori et. al], \mathcal{A}_S [Basser et. al], \mathcal{A}_{GT} [Reisert et. al] et \mathcal{A}_G [Frindel et. al]

	SNR	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB
$\sin \theta$	\mathcal{A}_{FACT}	0.4741	0.3334	0.2204	0.1751
	\mathcal{A}_S	0.6312	0.4656	0.2498	0.1210
	\mathcal{A}_{GT}	0.3153	0.2608	0.2306	0.2196
	\mathcal{A}_G	0.7186	0.6987	0.4983	0.1770
	\mathcal{A}^*	0.3237	0.2454	0.2230	0.2159
μ_{dat}	\mathcal{A}_{FACT}	0.0788	0.0366	0.0111	0.0027
	\mathcal{A}_S	0.2776	0.1850	0.0924	0.0340
	\mathcal{A}_{GT}	0.0619	0.0420	0.0327	0.0298
	\mathcal{A}_G	0.4263	0.4132	0.2756	0.1226
	\mathcal{A}^*	0.1430	0.1231	0.1250	0.1211
μ_{sim}	\mathcal{A}_{FACT}	0.3458	0.0828	0.0174	0.0039
	\mathcal{A}_S	0.0774	0.0365	0.0090	0.0017
	\mathcal{A}_{GT}	0.0545	0.0311	0.0274	0.0207
	\mathcal{A}_G	0.1975	0.1674	0.1133	0.0069
	\mathcal{A}^*	0.0671	0.0244	0.0104	0.0099

Déviation angulaire

0 = fibres parallèles
à la vérité terrain

Erreur moyenne des
fibres aux données

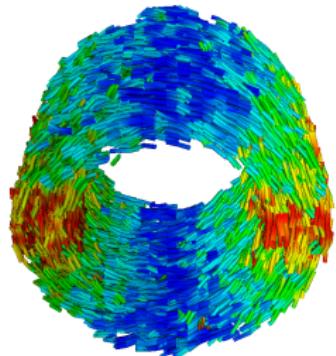
moyenne des erreurs
ponctuelles aux données

Mesure de similarité

0 = fibres parallèles et
superposées à la vérité
terrain

Robustesse au bruit d'acquisition

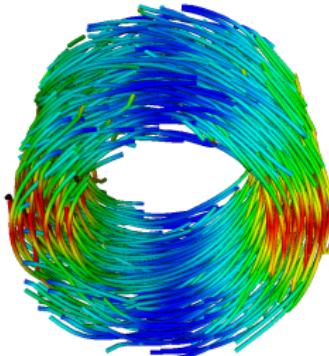
AFACT



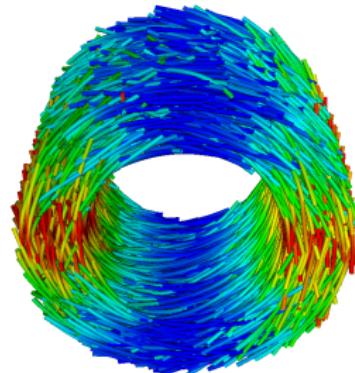
As

SNR=10 dB

A[★]



A_{GT}



A 3D visualization of a complex, tangled network of colored lines forming a spherical shape. The lines are primarily blue, green, and red, creating a dense, organic structure that resembles a tangled wire or a microscopic view of a cellular network.

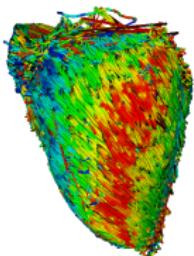
A_G

Comparaison sur données réelles : cœur ex-vivo

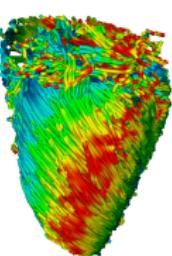
Résultats visuels

Cœur entier
 $(N_d, N_e) = (12, 6)$

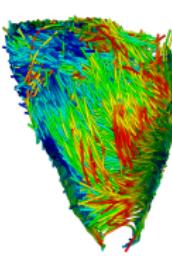
\mathcal{A}_{FACT}



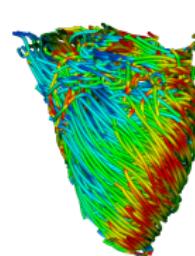
\mathcal{A}_S



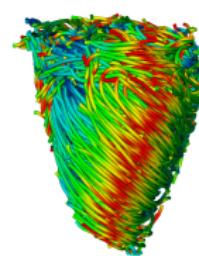
\mathcal{A}_{GT}



\mathcal{A}_G

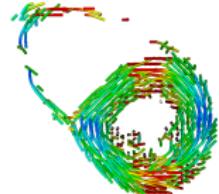
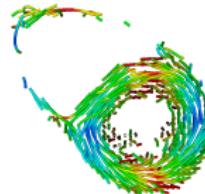
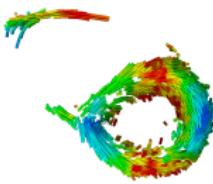
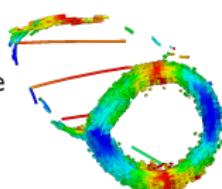


\mathcal{A}^*

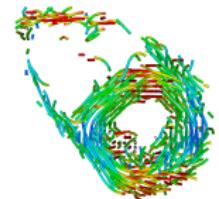
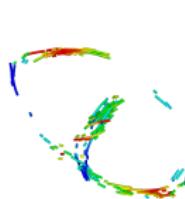
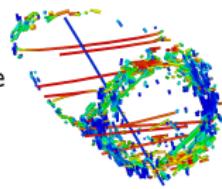


Cœur tranche
 $(N_d, N_e) = (12, 6)$

baisse
information

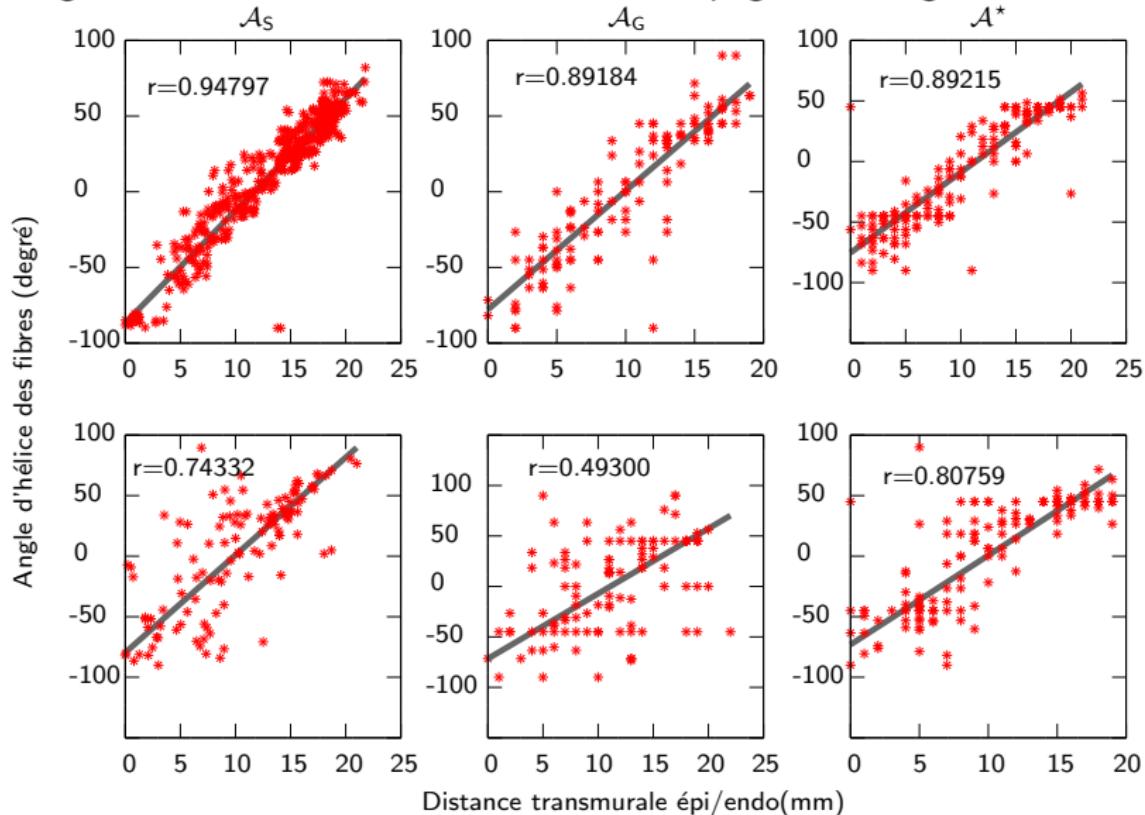


Cœur tranche
 $(N_d, N_e) = (6, 1)$



Comparaison sur données réelles : cœur ex-vivo

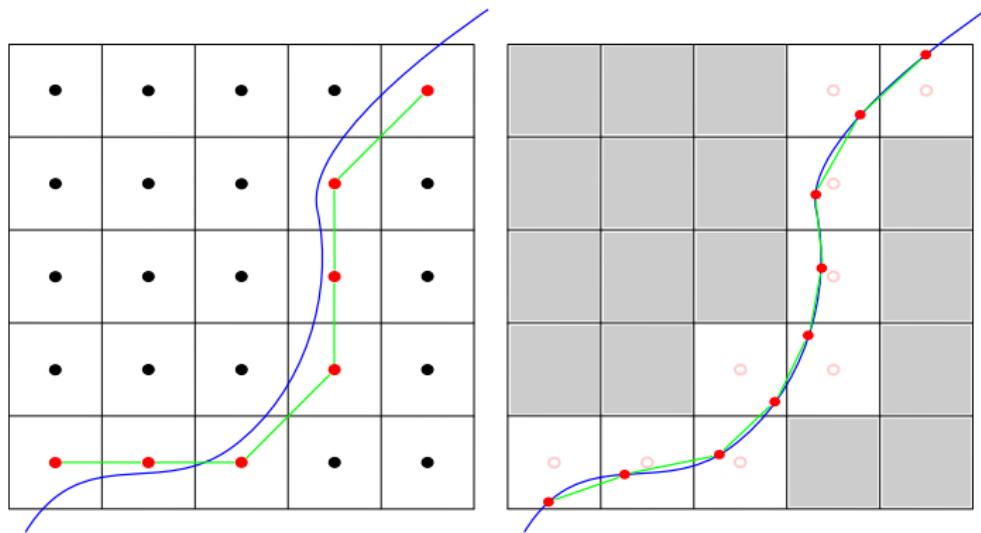
Angle d'hélice dans la zone 11 selon le découpage en 17 segments de l'AHA



Graphe élastique

Modèle élastique :

les positions des nœuds ne sont plus contraintes aux centres des voxel de la région d'intérêt



Graphe élastique

Modèle élastique :

les positions des nœuds ne sont plus contraintes aux centres des voxel de la région d'intérêt

mécanisme de communication implique les mouvements des arêtes, q_e , ET des nœuds q_v

Implications :

- 1 pas de post-traitement pour obtenir des fibres lisses
- 2 convergence plus rapide en nombre d'itérations

Graphe élastique

Mélange des mécanismes arêtes et nœuds

$$q_T = (1 - \zeta(T)) q_e + \zeta(T) q_v$$

Deux cas pour les proportions du mélange

$$\zeta^0(T_n) = 0.025 \quad (1)$$

$$\zeta^1(T) = \begin{cases} 0 & \text{si } n(T) < 0.5 \\ 0.05(2n(T) - 1) & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

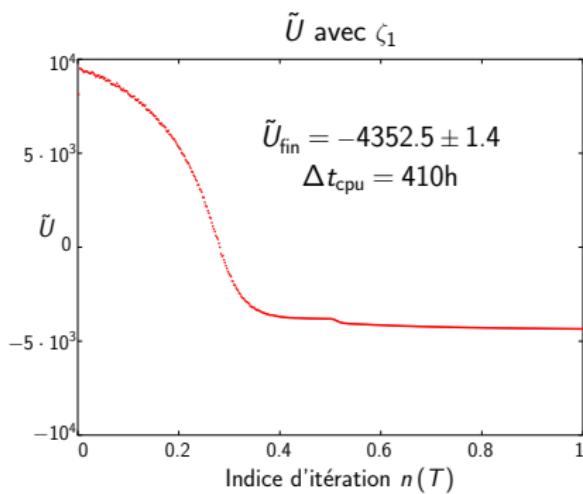
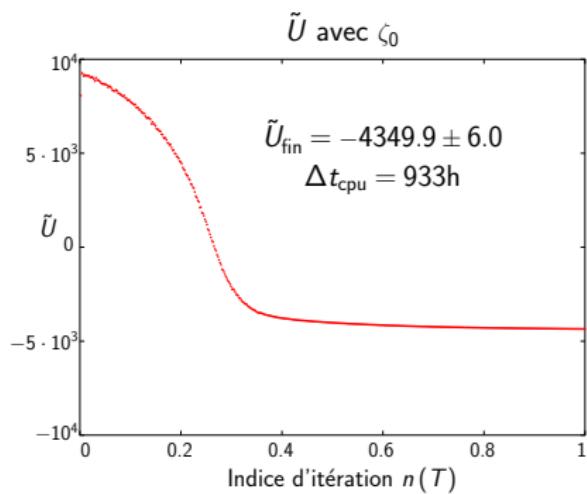
q_e réduit au mécanisme $q^{(1)}$ et $n(T)$ l'indice d'itérations normalisés

Le mouvement des nœuds relâche la force de contrainte sur la courbure

$$\beta(T) = \Delta\beta(1 - n(T)) + \beta_0$$

Expériences : caractérisation de l'algorithme

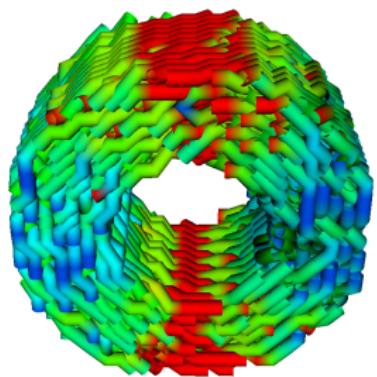
Comparaison des mécanismes de communication utilisant ζ_0 ou ζ_1 sur les données synthétique réduites



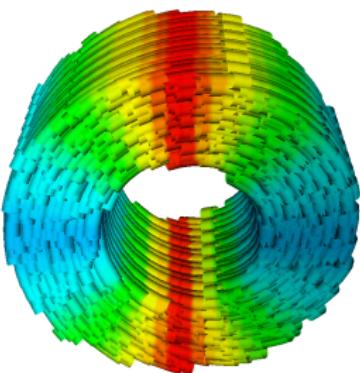
ζ_0 et ζ_1 mènent au même résultat avec un facteur relatif de temps supérieur à 2

Expériences : caractérisation de l'algorithme

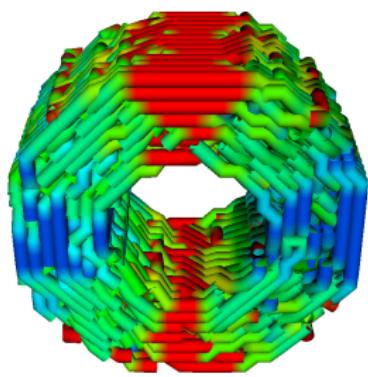
\mathcal{A}_G brut



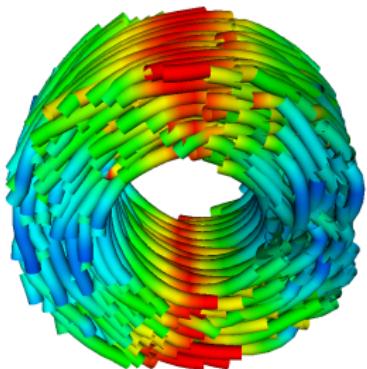
Référence



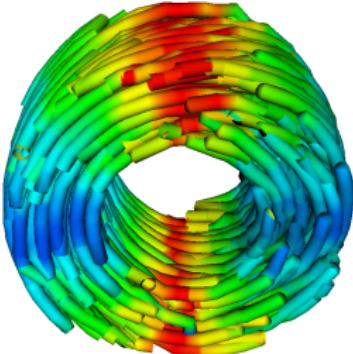
\mathcal{A}^* brut



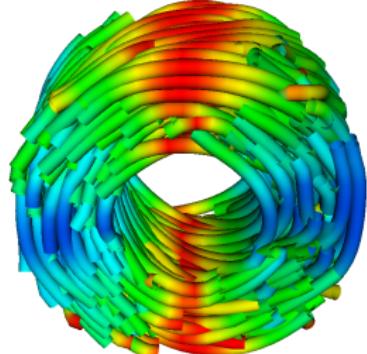
\mathcal{A}_G lisse



$\tilde{\mathcal{A}}$ brut



\mathcal{A}^* lisse



Expériences : caractérisation de l'algorithme

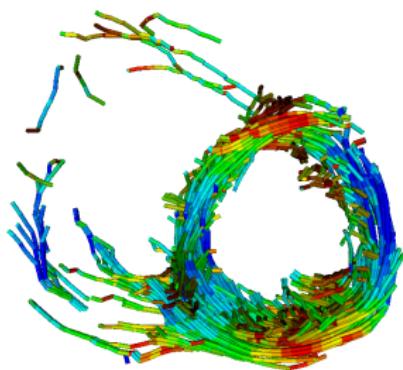
Comparaison des résultats de tractographie sur les données simulées bruitées

Mesure	SNR	Algorithme de tractographie				
		\mathcal{A}_S	\mathcal{A}_G	\mathcal{A}^*	Brut	$\tilde{\mathcal{A}}$
μ_{data}	∞	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.72 \cdot 10^{-3}$	$2.40 \cdot 10^{-3}$	$3.65 \cdot 10^{-4}$	$3.65 \cdot 10^{-4}$
	20	$7.97 \cdot 10^{-4}$	$2.30 \cdot 10^{-3}$	$2.39 \cdot 10^{-3}$	$6.83 \cdot 10^{-4}$	$6.83 \cdot 10^{-4}$
	10	$2.28 \cdot 10^{-2}$	$5.85 \cdot 10^{-3}$	$4.02 \cdot 10^{-3}$	$2.44 \cdot 10^{-3}$	$2.44 \cdot 10^{-3}$
	0	$9.01 \cdot 10^{-2}$	$1.61 \cdot 10^{-2}$	$1.92 \cdot 10^{-2}$	$2.27 \cdot 10^{-2}$	$2.27 \cdot 10^{-2}$
μ_{sim}	∞	$2.23 \cdot 10^{-4}$	$7.36 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-2}$	$7.75 \cdot 10^{-3}$	$1.01 \cdot 10^{-2}$
	20	$1.49 \cdot 10^{-3}$	$1.18 \cdot 10^{-2}$	$1.59 \cdot 10^{-2}$	$1.29 \cdot 10^{-2}$	$1.24 \cdot 10^{-2}$
	10	$3.12 \cdot 10^{-2}$	$4.13 \cdot 10^{-2}$	$2.21 \cdot 10^{-2}$	$3.50 \cdot 10^{-2}$	$1.86 \cdot 10^{-2}$
	0	$1.54 \cdot 10^{-1}$	$1.84 \cdot 10^{-1}$	$8.77 \cdot 10^{-2}$	$1.97 \cdot 10^{-1}$	$8.35 \cdot 10^{-2}$
$\sin \theta$	∞	$4.52 \cdot 10^{-2}$	$1.91 \cdot 10^{-1}$	$2.35 \cdot 10^{-1}$	$1.64 \cdot 10^{-1}$	$1.94 \cdot 10^{-1}$
	20	$1.45 \cdot 10^{-1}$	$2.21 \cdot 10^{-1}$	$2.39 \cdot 10^{-1}$	$2.05 \cdot 10^{-1}$	$2.02 \cdot 10^{-1}$
	10	$4.18 \cdot 10^{-1}$	$3.59 \cdot 10^{-1}$	$2.84 \cdot 10^{-1}$	$3.03 \cdot 10^{-1}$	$2.54 \cdot 10^{-1}$
	0	$6.82 \cdot 10^{-1}$	$6.54 \cdot 10^{-1}$	$5.38 \cdot 10^{-1}$	$5.84 \cdot 10^{-1}$	$5.42 \cdot 10^{-1}$

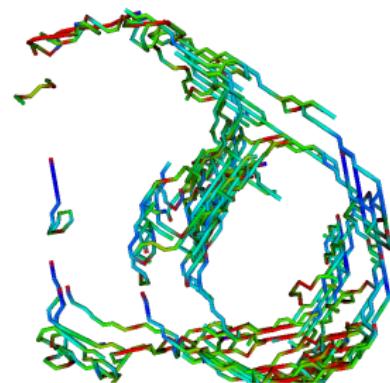
Données in-vivo

Fibres sans post-traitement

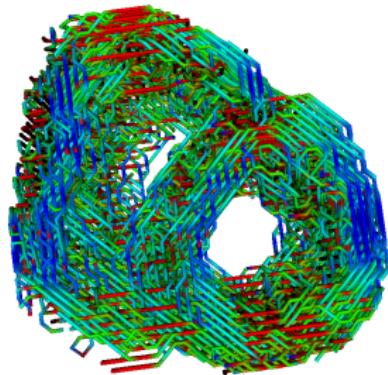
\mathcal{A}_S



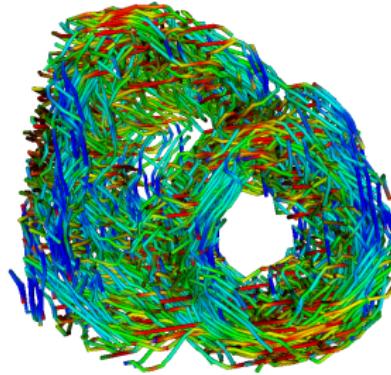
\mathcal{A}_G



\mathcal{A}^*



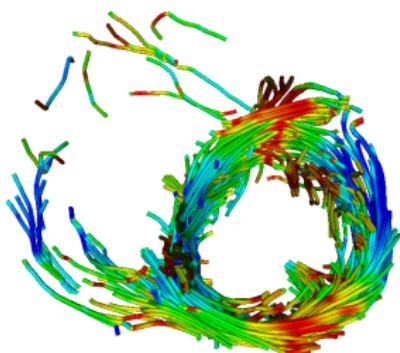
$\tilde{\mathcal{A}}$



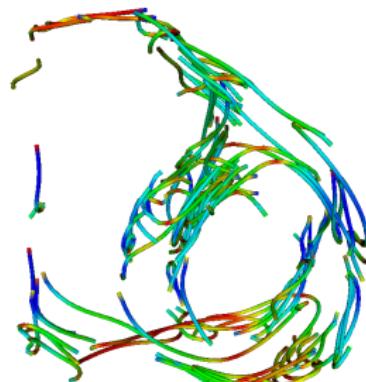
Données in-vivo

Fibres avec post-traitement

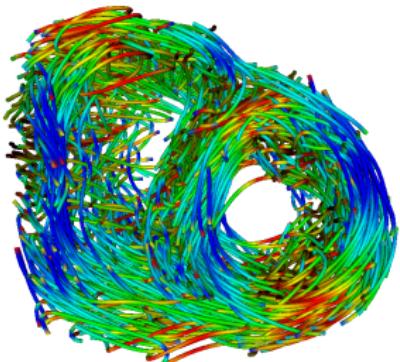
\mathcal{A}_S



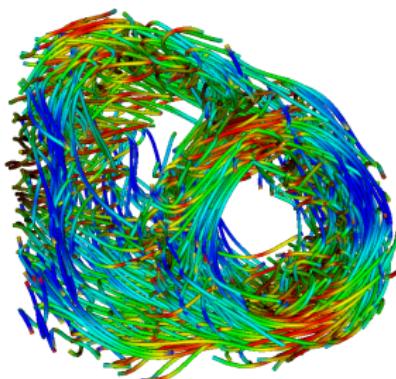
\mathcal{A}_G



\mathcal{A}^*



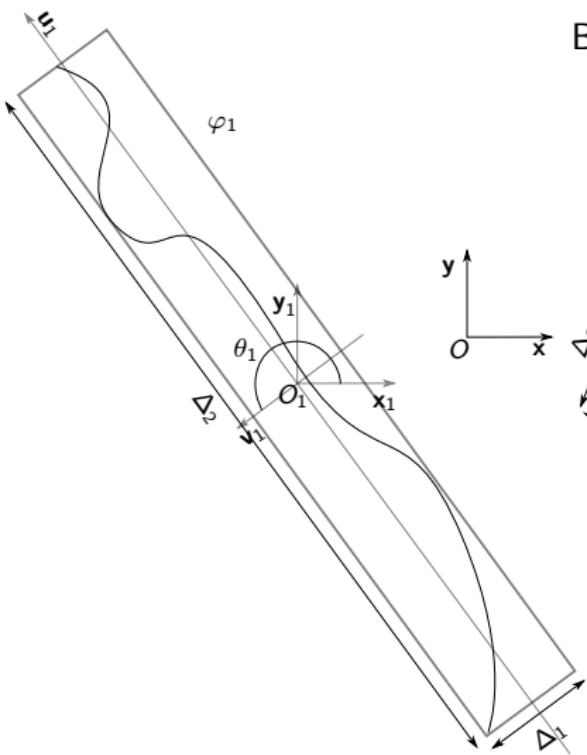
$\tilde{\mathcal{A}}$



Classification des fibres

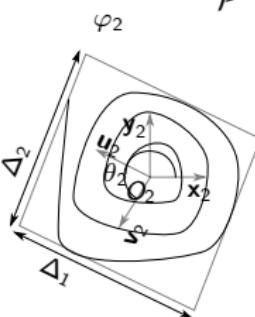
Niveaux de détails des fibres

Boîte englobante



Définition :

$$\mathcal{P} = \arg \min_{\mathfrak{P}_{\parallel}} \{\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3 | \mathfrak{C}_{\text{or}} \text{ et } \mathfrak{C}_{\text{pl}}\}$$



\mathfrak{C}_{or} : contrainte d'orientation

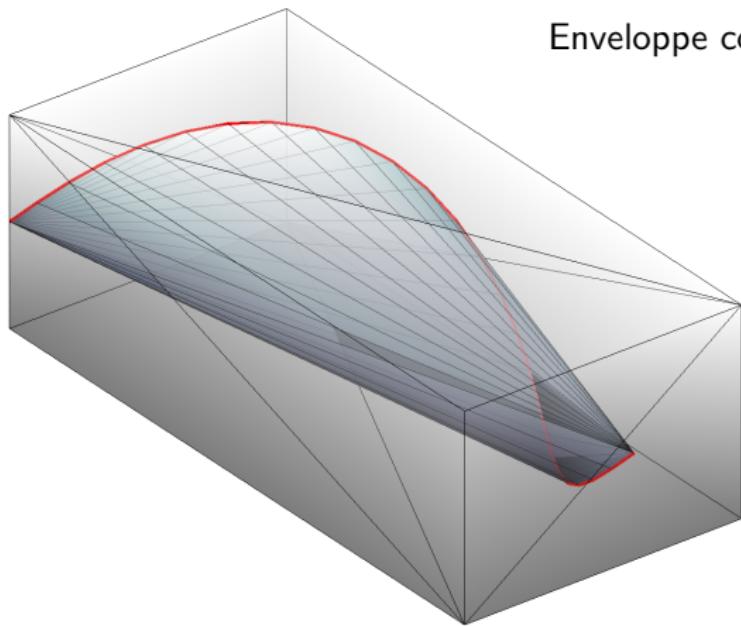
\mathfrak{C}_{pl} : contrainte d'appartenance

Mesure d'encombrement :

$$\mu_{\text{enc}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$$

Classification des fibres

Niveaux de détails des fibres



Enveloppe convexe

Définition :

$$\mathcal{C}(\phi) = \cap\{P(\mathbb{R}^3) | \phi \subset P(\mathbb{R}^3)\}$$

$P(\mathbb{R}^3)$ parties convexes de \mathbb{R}^3

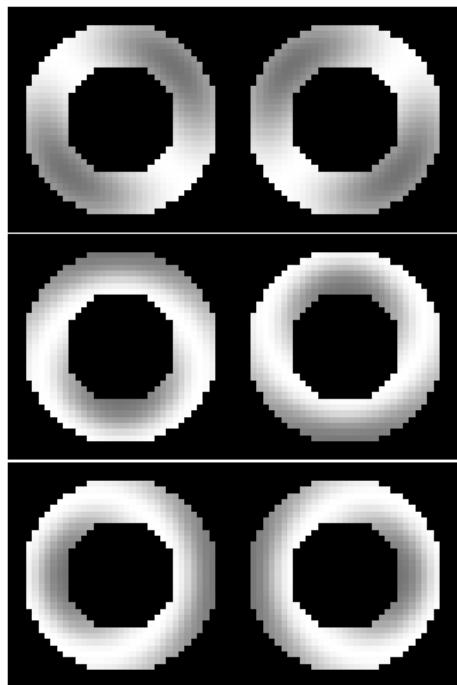
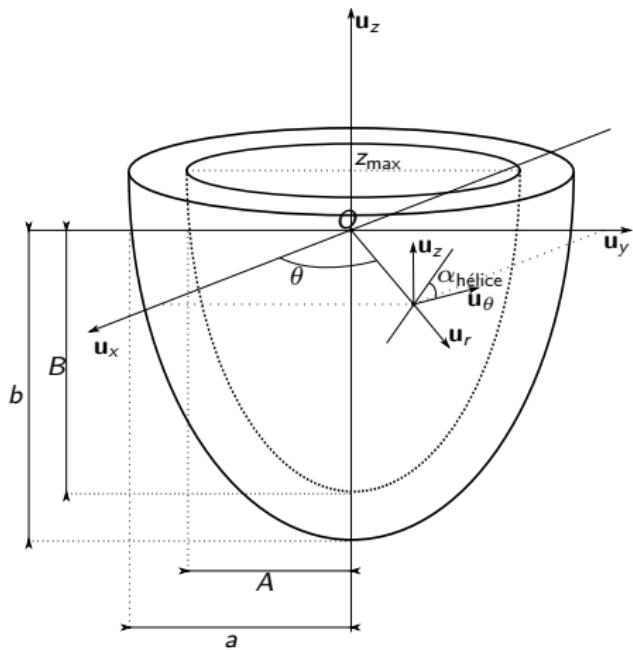
$\text{FAC}(\phi)$: facettes de $\mathcal{C}(\phi)$

Périmètre total moyen :

$$\mu_{\text{FAC}} = \frac{1}{|\text{FAC}(\phi)|} \sum_{f \in \text{FAC}(\phi)} \text{Per}(f)$$

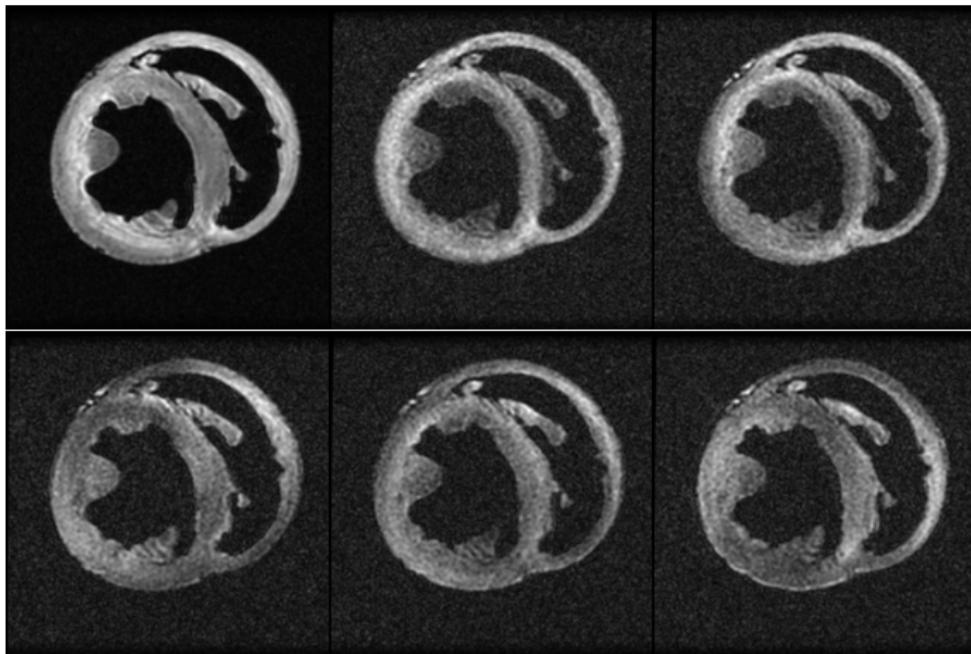
Données

Données synthétiques modélisant le Ventricule Gauche



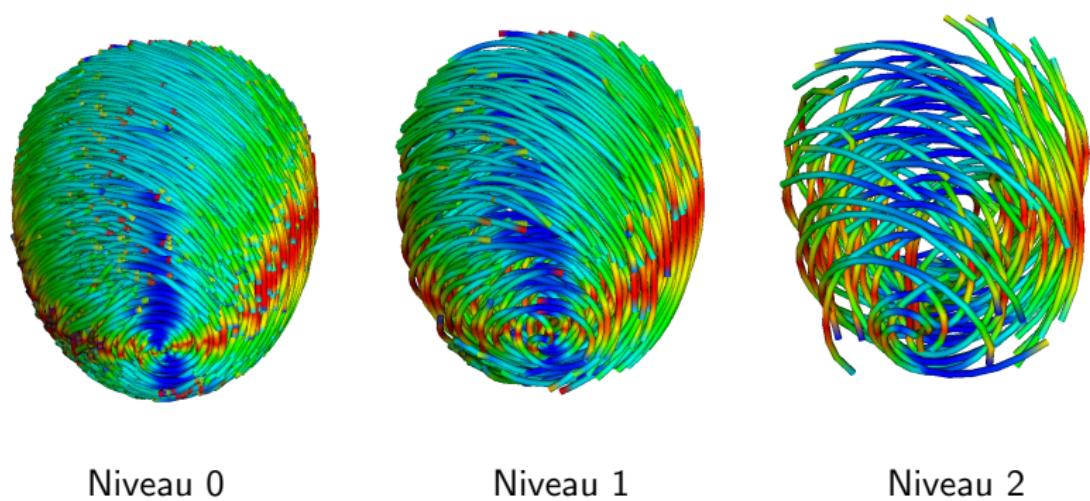
Données

Données réelles à haute résolution $0.3125 \times 0.3125 \times 0.8\text{mm}^3$
cœur canin accessible sur le site de JHU



Multi-échelle par décimation

Résultats visuels de la décimation des points de contrôle du graphe



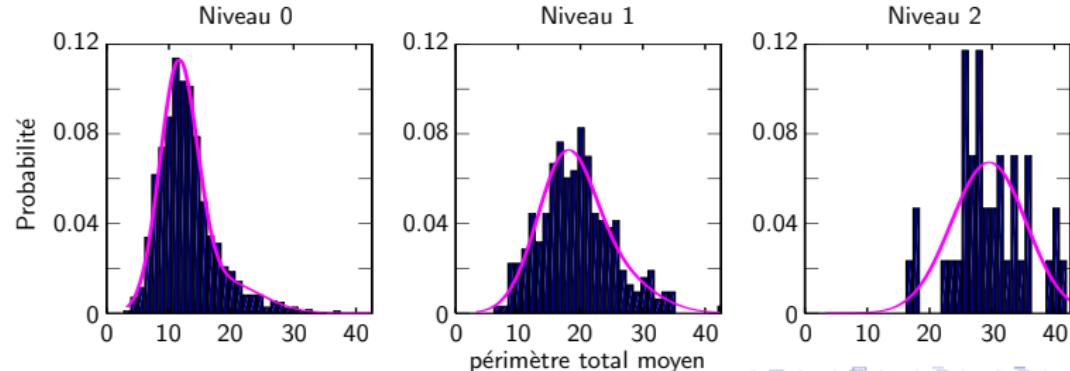
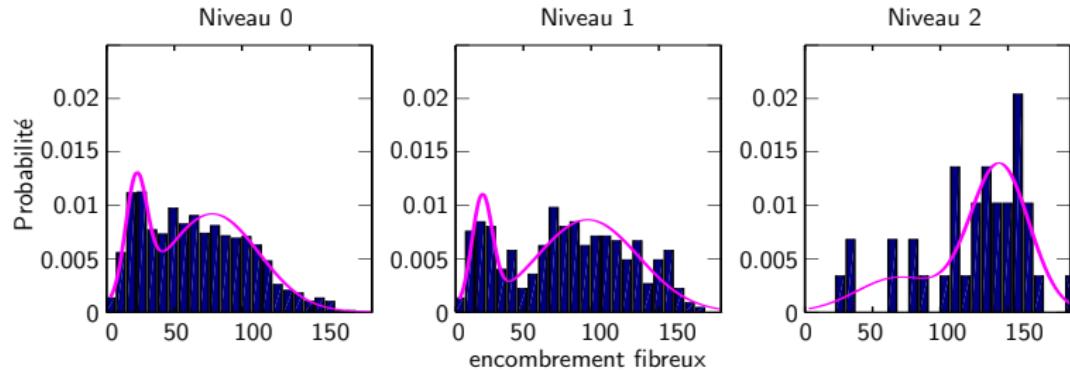
Niveau 0

Niveau 1

Niveau 2

Multi-échelle par décimation

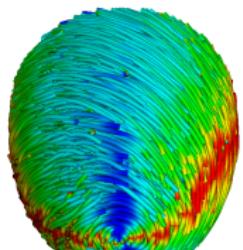
Effet de la décimation des points de contrôle sur le spectre des fibres



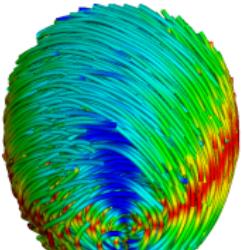
Niveau de détails des fibres

Résultats visuels du seuillage des fibres sur leur spectres

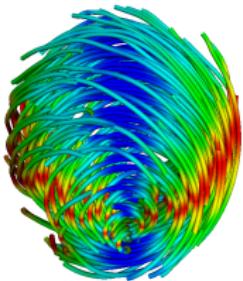
seuillage
 $\mu_{enc} > \mu_0$



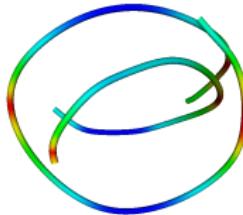
$\mu_0 = 5.0\text{mm}$
1613 fibres



$\mu_0 = 13.5\text{mm}$
596 fibres

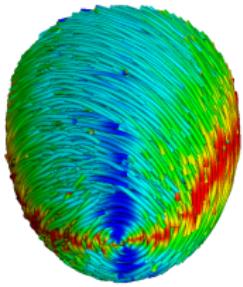


$\mu_0 = 20.5\text{mm}$
118 fibres

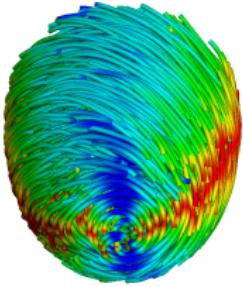


$\mu_0 = 35.0\text{mm}$
2 fibres

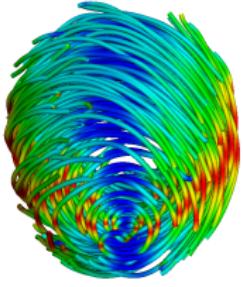
seuillage
 $\mu_{FAC} > \mu_1$



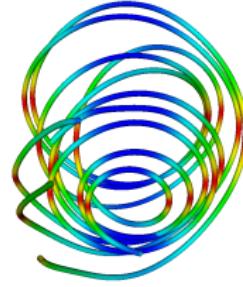
$\mu_1 = 10.0\text{mm}$
1613 fibres



$\mu_1 = 80\text{mm}$
589 fibres



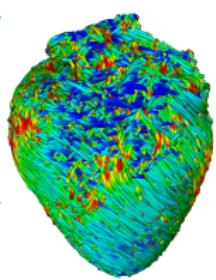
$\mu_1 = 125.0\text{mm}$
115 fibres



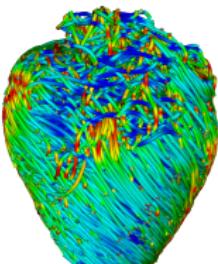
$\mu_1 = 180.0\text{mm}$
2 fibres

Niveau de détails des fibres

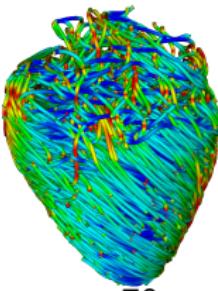
Résultats visuels du seuillage des fibres sur leur spectres



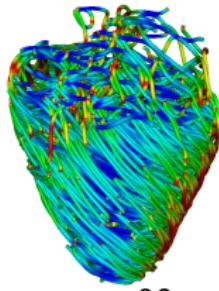
seuillage
 $\mu_{enc} > \mu_0$
 $\mu_0 = 0\text{mm}$
5565 fibres



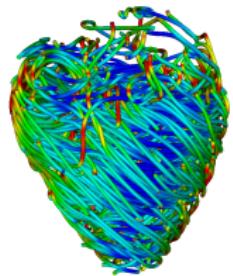
$\mu_0 = 50\text{mm}$
1516 fibres



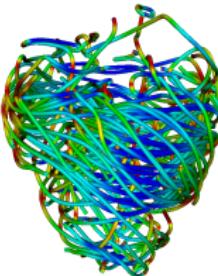
$\mu_0 = 70\text{mm}$
794 fibres



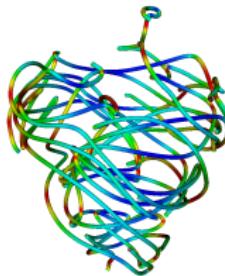
$\mu_0 = 90\text{mm}$
378 fibres



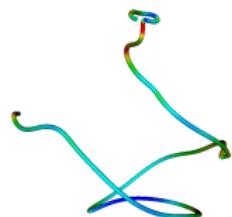
$\mu_0 = 110\text{mm}$
151 fibres



$\mu_0 = 130\text{mm}$
37 fibres



$\mu_0 = 150\text{mm}$
9 fibres



$\mu_0 = 180\text{mm}$
1 fibre

Plan de l'exposé

1. Introduction
 - 1.1. Contexte
 - 1.2. L'outil tractographie
 - 1.3. La fibre : une notion floue
 - 1.4. Point historique
2. Contributions
 - 2.1. Chaine de traitement et formulation
 - 2.2. Tractographie rigide
 - 2.3. Graphe élastique : vibration des nœuds
 - 2.4. Classification de l'information des fibres : fibres multi-échelles
3. Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Tractographie

- 1 Formulation de la tractographie par graphe appliquée au domaine cardiaque
- 2 Deux versions de la formulation : mise en évidence de différentes caractéristiques
- 3 Comparaison avec d'autres algorithme de la littérature
- 4 Application à des données ex-vivo et in-vivo

Mesures

- 1 Définition de mesures de comparaison de fibre
- 2 Introduction de la notion d'échelle et de détails des fibres ainsi qu'une quantification des détails

Conclusions et perspectives

Technique

- 1 Le code est à optimiser : allocation, instruction, structure...
- 2 Caractérisation plus profonde des algorithmes par rapport à la quantité de direction de diffusion
- 3 Format de compression de fibre avec pertes contrôlées

Recherche

- 1 Comparaison sur plus de données
- 2 L'optimisation de l'énergie : parallélisation du recuit
- 3 Reformulation de l'attache aux données sans prendre en compte un modèle de diffusion
- 4 Mesures de détails dans un cadre clinique

Publication et communications

Papier

M. Ozon, M. Robini, P. Croisille, C. Frindel, Y. Zhu. *Toward temporal fiber Computing* in Cardiology Conference 2013, Zaragoza, Spain, 567-570, 2013, IEEE.

M. Ozon, M. Robini, Y. Zhu. *Global DT-MRI Tractography Using Elastic Graphs* IEEE EMBC 2014, Chicago IL, USA, 26-30, 2014, IEEE.

Poster

M. Ozon, M. Robini, P. Croisille, C. Frindel, Y. Zhu. *Global cardiac tractography using DT-MRI* Computing in Cardiology Conference 2013, Zaragoza, Spain, 2013, IEEE.

M. Ozon, M. Robini, P. Croisille, C. Frindel, Y. Zhu. *Optimal cardiac tractography using DT-MRI* 11th IEEE EMBS International Summer School on Biomedical Imaging, Saint-Jacut de la mer, France, 2014, IEEE.

M. Ozon, M. Robini, Y. Zhu. *Global DT-MRI Tractography Using Elastic Graphs* IEEE EMBC 2014, Chicago IL, USA, 2014, IEEE.

Fin

Merci pour votre attention !