

# Evaluation des méthodes d'extraction des orientations locales des faisceaux de fibres par analyse quantitative de la connectivité

T. Megherbi<sup>1</sup>

G. Girard<sup>2</sup>

M. Descotaux<sup>2</sup>

F.O. Boumghar<sup>1</sup>

R. Deriche<sup>3</sup>

<sup>1</sup> USTHB, FEI, LRPE, ParIMed, Alger, Algérie.

<sup>2</sup> Sherbrooke Connectivity Imaging Lab, Université de Sherbrooke, QC, Canada.

<sup>3</sup> Equipe-Projet Athena, Inria Sophia Antipolis-Méditerranée, France.

Tina.megherbi@gmail.com

## Résumé

La détection des orientations locales des faisceaux de fibres constitue une étape importante pour les algorithmes de suivi de fibres (tractographie). En effet, la fiabilité de la connectivité résultante dépend de la qualité de l'extraction de ces orientations locales de fibres. Sur la base des résultats produits au niveau de la tractographie, nous avons évalué et comparé un ensemble d'algorithmes d'extraction des orientations des faisceaux de fibres. Une analyse quantitative de la connectivité a été ainsi réalisée en utilisant un outil appelé le Tractometer. Cet outil permet grâce à un certain nombre de métriques de quantifier la fiabilité des connexions reconstruites et aussi la performance des algorithmes de suivi de fibre utilisés.

Toutes les méthodes d'extraction des orientations de fibres mises en œuvre ont été évaluées sur la base des résultats de deux types d'algorithmes de tractographie, déterministe et probabiliste. De plus, l'ensemble de ces méthodes ont été exécutées sur deux types de données de diffusion, des données à haute résolution angulaire de 60 directions de gradient et des données à basse résolution angulaire de 30 directions de gradient, ces deux jeux de données ont été corrompus par un bruit Ricien d'un rapport SNR de 20 puis de 10. Dans cet article, nous présentons les résultats obtenus par ce travail de validation et de comparaison.

## Mots Clef

fODF, Orientations des fibres, Tractographie, Tractometer.

## Abstract

Recovering of the fiber orientations in each voxel constitutes an important step for the fiber tracking algorithms. In fact, the reliability of the resulted connectivity depends on how well the local fiber orientations were extracted. Based on the tractography results we evaluated and compared different methods of fiber orientations extraction. Thus, we analyzed quantitatively the resulted connectivity by using the Tractometer tool. This later allows by measuring a number of metrics to quantify the connections reliability and the tractography performance. All the methods of fiber orientations extraction were evaluated on two types of tractography algorithms, deterministic and probabilistic algorithms. Furthermore, all of these methods have been executed on two types of data, high

angular resolution data acquired with 60 gradient directions and low angular resolution data, acquired with 30 gradient directions. These two types of data were corrupted with a Ricien noise of ratio SNR=20, 10. In this article, we present the results obtained by our validation and comparison work.

## Keywords

fODF, fiber orientations, Tractography, Tractometer..

## 1 Introduction

L'IRM de diffusion (IRMd) [1] est la modalité d'imagerie médicale qui permet, grâce à la quantification du mouvement libre et contraint des molécules d'eau, de cartographier le cerveau humain et de révéler la structure fibreuse de la substance blanche (SB) cérébrale. Le but ultime de l'IRMd est ainsi la reconstruction de la connectivité cérébrale, constituée par les milliers de faisceaux de fibres connectant les différentes aires corticales et sous-corticales du cerveau. La reconstruction de ces faisceaux de fibres s'effectue grâce à des algorithmes de suivi des orientations locales de fibres appelés tractographie. Afin d'assurer la fiabilité des faisceaux reconstruits il faut donc être capable de reconstruire de manière précise les directions locales des fibres, celles-ci correspondent aux directions principales de la diffusion des molécules d'eau. Différentes techniques ont été proposées dans la littérature pour résoudre ce problème, d'abord le modèle du tenseur de diffusion en 1992 [2] qui modélise la diffusion par un tenseur symétrique du deuxième ordre, dont le vecteur propre principal correspond à la direction préférentiel de la diffusion. Ce modèle dit à basse résolution angulaire, suppose la présence d'un seul faisceau de fibres par voxel, ce qui le rend inadapté pour reconstruire les nombreux croisements de fibres présents dans la SB cérébrale. Plus tard, des techniques d'imagerie à haute résolution angulaire (HARDI) ont été proposées pour résoudre ce problème des croisements de fibres. Trois principales techniques d'acquisition sont possibles en HARDI, l'imagerie du spectre de diffusion (DSI) [3], l'imagerie Q-Ball (QBI) [4] ou encore l'acquisition multi-shell [5]. A partir de ces techniques il est possible de reconstruire les orientations des faisceaux de fibres grâce à la fonction de distribution d'orientation de fibres (fODF ou FOD), celle-ci contient toute l'information angulaire du propagateur de diffusion. En effet, les maxima de la fonction fODF [6] coïncident avec les orientations locales de la diffusion et ainsi des fibres sous-jacentes.

Dans nos précédents travaux [7, 8, 9, 10] nous nous sommes particulièrement intéressés au problème de détection des orientations de fibres qui peut être réalisée par des techniques d'extraction des maxima locaux. La précision des orientations locales des fibres joue un rôle important dans la fiabilité des connexions reconstruites. Dans la littérature [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], l'efficacité des techniques d'extraction des orientations locales s'évalue et se quantifie selon des critères de mesures angulaires locales, telles que, la précision et la résolution angulaire. Dans le travail que nous présentons dans cet article, nous avons évalué un ensemble représentatif de toutes ces techniques non pas à travers une mesure locale mais, à travers les résultats qu'elles produisent au niveau de la connectivité globale. Nous avons estimé qu'il était important de pouvoir quantifier l'effet de ces méthodes d'extraction sur la connectivité et ainsi pouvoir valider les résultats obtenus en local.

Pour réaliser notre étude, nous avons utilisé un outil d'analyse de la connectivité, appelé le *Tractometer* [25]. Une étude comparable a été réalisée lors du challenge : *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2013 Reconstruction Challenge* [24] ; mais, bien que cette compétition ait mis en œuvre différentes méthodes de reconstruction de fibres, elle n'évalue cependant pas les méthodes d'extraction des maxima des fonctions reconstruites et, on note aussi l'absence des techniques basées sur les tenseurs d'ordre supérieur. Nous entamons l'article par une présentation de la méthodologie suivie puis, nous décrivons les outils mis en œuvre dans ce travail et enfin nous présentons les résultats obtenus dans cette étude.

## 2 Méthodologie

Dans ce travail nous avons évalué différentes techniques de reconstruction et d'extraction des orientations de faisceaux de fibres en nous basant sur les résultats des algorithmes de tractographie. En effet, grâce à un outil appelé le *Tractometer* [25] on est capable d'analyser de manière quantitative la connectivité résultante de la tractographie. Les techniques évaluées peuvent être répertoriées en deux types : les classiques, qui consistent en l'extraction des orientations des fibres, soit de manière exhaustive [14] à partir d'une fonction d'orientation de fibre (fODF), ou par la résolution d'une équation polynomiale [11, 15] et, les techniques basées sur les tenseurs d'ordre supérieur et la décomposition de tenseurs [7, 8, 10].

Notre méthodologie se segmente en trois phases importantes (figure 1), la première, est la reconstruction des orientations des faisceaux de fibres à partir d'un jeu de données brutes. Pour cela, la fonction d'orientation de distribution de fibre (fODF) est reconstruite à partir du signal puis ses maxima ou ses peaks sont extraits par les différentes méthodes décrites dans la section suivante. La deuxième phase, est la reconstruction de la connectivité à l'aide de la tractographie et ce, à partir des orientations locales des fibres extraites en chaque voxel et par chacune des différentes méthodes. Nous avons utilisé un algorithme de tractographie déterministe [14, 16] et un autre probabiliste [14, 16]. La dernière phase consiste en l'analyse de la

connectivité résultante de la tractographie à l'aide du *Tractometer* que nous décrivons en paragraphe 3.3.

### 2.1 Méthodes évaluées

Nous présentons ici les différentes techniques d'extraction des orientations de fibres évaluées lors de notre étude. Avant d'extraire ces orientations il est d'abord nécessaire de reconstruire soit la fonction de distribution d'orientation de diffusion (ODF) [17] ou bien la fonction de distribution d'orientation de fibre dite fODF ou FOD [6], ces deux fonctions ont leurs maxima alignés sur les orientations des fibres sous-jacentes. Nous travaillons ici avec la fODF car elle est plus aiguë que l'ODF, présentant ainsi une meilleure résolution angulaire. La fODF peut être estimée à partir du signal de diffusion brute par déconvolution sphérique de celui-ci avec un noyau de deconvolution (figure 2).

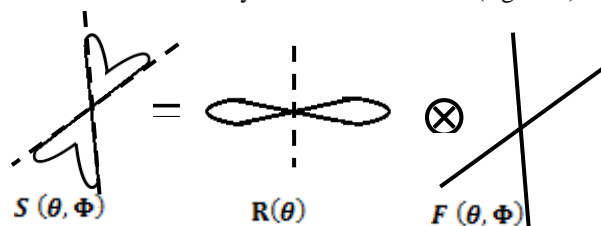


Figure 2 : Relation de convolution sphérique entre le signal de diffusion brute et la fonction fODF.

Avec  $S$  le signal de diffusion brute,  $R$  le noyau de déconvolution sphérique et  $F$  la fonction fODF. Pour éviter que la fonction fODF ne soit sujette aux valeurs négatives, il faut soit lui appliquer la contrainte de positivité tel que décrit dans [6] ce qui donne le CSD pour *constrained spherical deconvolution*, ou la reformuler comme un tenseur d'ordre supérieur symétrique et défini positif appelé CT-FOD pour le *Cartesian Tensor FOD* [18]. A partir de la fonction fODF il est ainsi possible de récupérer les orientations des faisceaux de fibres en utilisant des méthodes d'extraction des maxima. Dans notre travail, l'extraction des maxima est réalisée soit de manière exhaustive sur une CSD d'ordres 8, 6 et 4 noté ici,  $CSD_8$ ,  $CSD_6$  et  $CSD_4$  [6, 21] respectivement, soit en résolvant le problème de calcul des valeurs propres du tenseur d'ordre 4 CT-FOD [19, 11], nous avons noté cette méthode ZeigVals. Toujours à partir du tenseur CT-FOD d'ordre 4 nous avons aussi extrait les maxima par décomposition de ce tenseur en utilisant deux approches : une numérique appelée Parafac [12] et l'autre analytique appelée AdecompSHOT [7, 8]. En fin, nous avons aussi mis en œuvre une autre méthode que nous appelons, spFOD pour *sparse FOD*, celle-ci combine la technique de deconvolution sphérique et la formulation de la décomposition de tenseur [10, 20], en effet la fonction spFOD modélise la FOD sous forme d'un tenseur décomposable soit en somme de tenseurs de rang-1. Nous invitons le lecteur à se référer aux références citées, relatives à chacune de ces techniques pour plus de détails. La figure 3 décrit la mise en œuvre de ces méthodes, pour la détection des orientations de fibres à partir des données de diffusion.

### 3 Outils

#### 3.1 Données de diffusion synthétiques

Pour évaluer de manière quantitative la qualité de la tractographie résultante des différents algorithmes d'extraction des orientations de fibres, nous avons utilisé l'ensemble de données synthétiques « phantom » (figure 4) créé pour le Challenge : *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2013 Reconstruction Challenge* [22, 23]. Ce phantom est composé de 27 faisceaux de fibres avec plusieurs régions à configurations complexes présentant des embranchements, des embrassements et des croisements de faisceaux de fibres à des angles compris entre 30 et 90°. Pour notre étude, nous avons utilisé deux types d'acquisitions, celles à basse résolution angulaire et des acquisitions HARDI. Les données à basse résolution ont été simulées avec 30 directions de gradient et un b-value de  $b=1200 \text{ s/mm}^2$ , tandis que les données HARDI ont été simulées avec 60 directions de gradient et un b-value de  $b=3000 \text{ s/mm}^2$ , avec un rapport signal sur bruit (SNR) de 10 et de 20 pour les deux protocoles d'acquisitions.

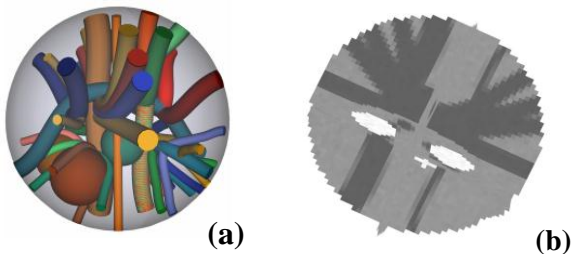


Figure 4: Données synthétiques : (a) Phantom, présentant différentes configurations de faisceaux de fibres [24], (b) Signal de diffusion synthétique brute obtenu à partir du phantom en (a).

#### 3.2 Algorithmes de tractographie

Pour reconstruire la connectivité à partir des orientations de fibres extraites, nous avons eu recours aux techniques de tractographie. Ainsi, nous avons

utilisé deux types d'algorithmes, un déterministe et un autre probabiliste. Le principe de base de ces deux algorithmes est décrit dans [14, 16, 27]. Cependant, de manière générale, nous pouvons décrire ces algorithmes comme étant le suivi des orientations locales des fibres sous-jacentes, dans un volume délimité par le masque de la substance blanche. La longueur de pas discret utilisée est de  $\Delta s=0,2\text{mm}$ , soit environ un dixième de la taille d'un voxel, et l'angle de déviation maximale est de 45° [27].

Pour que les résultats des deux algorithmes déterministe et probabiliste puissent être comparables, le suivi est initié à partir du même nombre de points de départ ou *seeds*. En effet, comme nous le verrons en paragraphe 3.3, il y a des métriques telles que la moyenne de couverture ABC qui dépendent du nombre de *seeds* à partir desquelles le suivi sera lancé.

Dans un voxel identifié pour initier le suivi, ces points *seeds* sont choisis de manière aléatoire tel que décrit par J. D. Tournier dans [27] plutôt que de considérer seulement le centre du voxel ; cette stratégie permet de couvrir le voxel de manière approximativement uniforme. Evidemment plus le nombre de *seeds* est important plus la couverture est meilleure. A partir de chaque point *seed* le suivi sera initié le long d'une direction initiale choisie aléatoirement parmi les maxima présents à la position initiale. Le caractère déterministe ou probabiliste des algorithmes utilisés est relatif à la manière dont la direction de propagation est choisie.

**Algorithme déterministe:** pour l'algorithme déterministe, la direction de propagation  $v_{i+1}$  correspond à la direction la plus alignée à la position courante avec la direction précédente  $v_i$ .

**Algorithme probabiliste:** pour l'algorithme probabiliste, la direction de propagation  $v_{i+1}$  est tirée aléatoirement parmi toutes les directions dans le cône d'ouverture de 45°. Chaque direction est pondérée par la valeur de la fODF et/ou par le poids relatif à la direction dans le cas d'une extraction par décomposition de tenseurs.

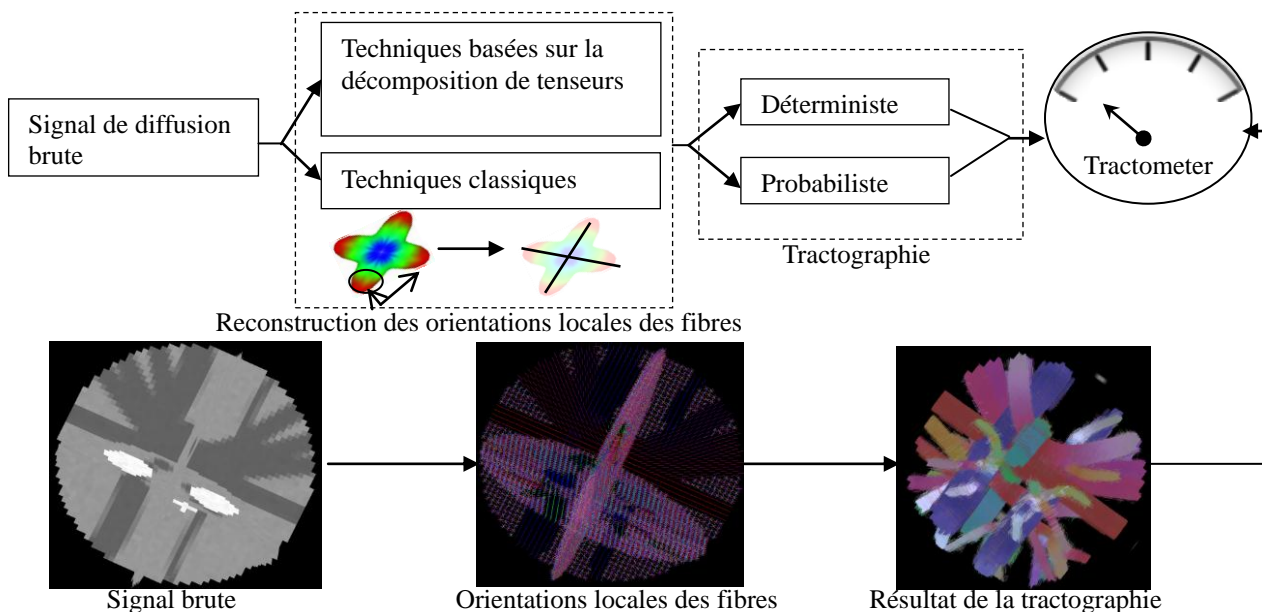


Figure 1: Schéma résumant la méthodologie de notre processus de validation

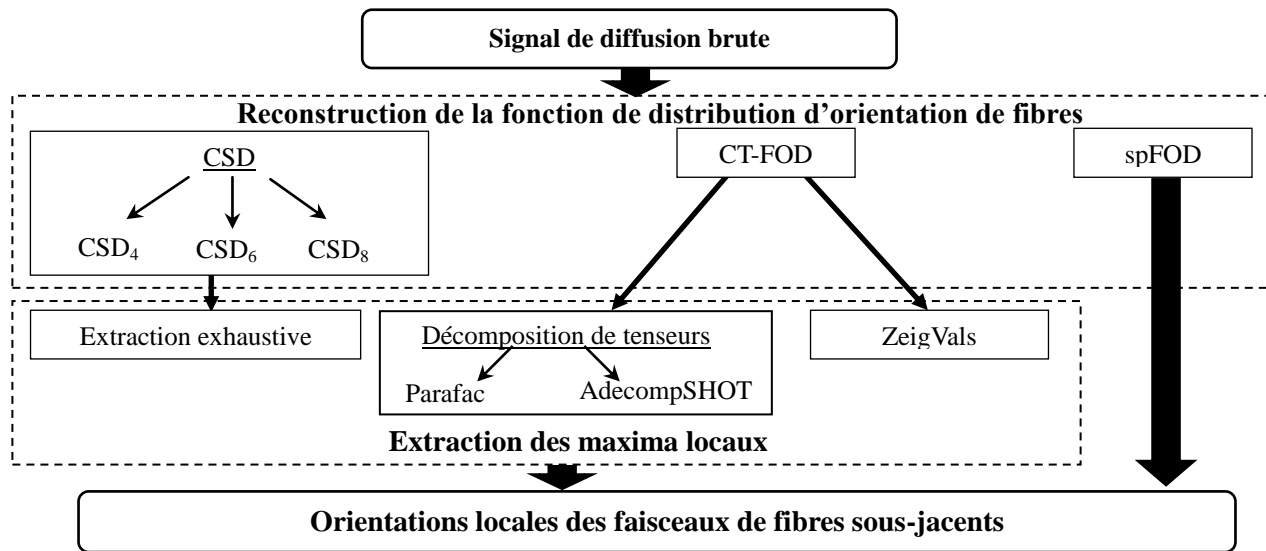


Figure 3: Détection des orientations locales des faisceaux de fibres à partir des données d'IRMd.

### 3.3 Le Tractometer : Outil d'évaluation de la connectivité.

Pour évaluer et comparer le résultat de la tractographie nous avons utilisé le « **Tractometer** » [25, 16], cet outil permet grâce au calcul d'un certain nombre de métriques d'évaluer et d'analyser de manière quantitative la connectivité globale reconstruite par tractographie. Les métriques qui peuvent être calculés par le tractometer sont les suivants :

**Valid Connections (VC)** : représentant le pourcentage de streamlines connectant des paires de régions valides.

**Invalid Connections (IC)**: représentant le pourcentage de streamlines connectant des paires de régions non valides ou connectant une paire de régions valides, mais sortant du masque de matière blanche définissant le faisceau.

**No Connections (NC)** : représentant le pourcentage de streamlines qui ne connectent pas deux région.

**Average Bundle Coverage (ABC)**: moyenne des pourcentages de couverture des voxels dans les faisceaux. Pour chaque faisceau, on compte le nombre de voxels traversés par au moins une streamline et on compare avec le nombre total de voxel du faisceau. ABC est la moyenne pour tous les faisceaux.

**Invalid bundles (IB)** : Nombre de paires de régions connectées par au moins une streamline, mais qui ne devraient pas l'être.

**Valid Bundles (VB)**: Nombre de paires de régions correctement connectées par au moins une streamline. (Dans le phantom que nous utilisons il y a 27 faisceaux).

Les paramètres IB, VB et ABC dépendent particulièrement du nombre de seeds utilisés dans la tractographie, dans notre cas particulier où le nombre de seeds est égal pour toutes les méthodes évaluées, ces paramètres peuvent être significatifs. Cependant, pour quantifier de manière efficace la connectivité, G. Girard et collègues [16] ont proposé de calculer à partir des mesures VC, IC et NC, deux nouvelles métriques appelées VCCR pour *Valid Connection to Connection Ratio* et CSR pour *Connection to Seed Ratio*. La

première métrique donnée en équation 1 reflète quantitativement la précision de la connectivité en mesurant la proportion de connexions valides par rapport à l'ensemble des connexions reconstruites [16].

$$VCCR = VC / (VC + IC) \quad (1)$$

La seconde métrique (Eq. 2) est un indice de performance de l'algorithme de tractographie, en effet, elle mesure le rapport entre les connexions reconstruites et le nombre total  $s$  de seeds utilisés au départ [16].

$$CSR = (VC + IC) / s \quad (2)$$

Si tous les seeds utilisés lors de la tractographie produisent une streamline alors CSR devient [16]:

$$CSR = (VC + IC) / (VC + IC + NC) \quad (3)$$

## 4 Tests et résultats

Dans un premier temps, nous avons mené notre expérimentation sur des données phantom non bruitées, puis nous les avons corrompus par un bruit Ricien avec un SNR de 20 et de 10. Deux ensembles de données ont été utilisés, les premières simulées avec 60 directions de gradient (HARDI) et les secondes avec 30 directions de gradient. A partir de ces jeux de données, nous avons reconstruit et extrait les orientations locales des faisceaux de fibres avec les méthodes résumées sur la figure 3 à savoir : les techniques CSD [21], la méthode spFOD [10], la méthode Parafac [12], la méthode AdecompSHOT [7] et enfin la méthode ZeigVals [11]. A partir des orientations locales des fibres sous-jacentes récupérées, la connectivité globale a ensuite été reconstruite par des algorithmes de tractographie [14, 16]. Afin d'évaluer la cohérence de nos résultats sur différents algorithmes de tractographie, nous avons mené nos tests avec les deux d'algorithmes déterministe et probabiliste décrits en paragraphe 3.2. En dernière étape, nous avons analysé la connectivité résultante pour chaque méthode en utilisant le Tractometer.

Pour quantifier la qualité de la tractographie et de la connectivité, nous nous sommes principalement basé sur les trois métriques suivantes: ABC, CSR et VCCR.

**Acquisition HARDI** : La figure 5 montre les résultats obtenus par l'analyse de la connectivité obtenue à partir d'un ensemble de données HARDI non bruitées. La

figure 5-a montre les résultats d'une tractographie déterministe et la figure 5-b montre les résultats pour une tractographie probabiliste. Le paramètre VCCR traduit en % la fiabilité des connexions retrouvées, plus il est élevé plus la proportion des connexions valides, par rapport à l'ensemble des connexions retrouvées, est grande. Sur la figure 5-a, le paramètre VCCR montre trois niveaux de performance, les méthodes ZeigVals et  $CSD_4$  présentent un rapport VCCR de moins de 58% contre un rapport VCCR variant entre 66,8% et 72,2% pour les méthodes  $CSD_6$ , AdecompSHOT,  $CSD_8$  et Parafac. La méthode spFOD quant à elle, se distingue des autres, en donnant le meilleur résultat avec un rapport VCCR de 79,5%. Ces observations sont confirmées par les paramètres ABC et CSR. En effet, ABC peut renseigner aussi sur la précision de la connectivité, car il mesure le pourcentage moyen des voxels des faisceaux traversés par au moins une streamline valide. Le graphe de ABC est cohérent avec celui de VCCR, avec une valeur maximale pour la méthode spFOD, le minimum est donné par la méthode ZeigVals, et au milieu on retrouve les quatre méthodes plus ou moins équivalente  $CSD_6$ , AdecompSHOT,  $CSD_8$  et Parafac. Le paramètre CSR renseigne sur la performance de la tractographie à connecter les extrémités des faisceaux, plus il est élevé, plus la tractographie est performante. En effet, comme le montre l'équation 3 le CSR dépend du paramètre NC, plus ce paramètre est faible par rapport à la somme (VC+IC) plus le CSR est élevé et inversement. L'apparition de NC est dû à l'arrêt de la tractographie, et ceci peut être provoqué par 3 raisons: 1- il y a une direction manquante, 2- l'angle de déviation est trop élevé entre les directions, 3- une direction qui mène le tracking à l'extérieur du masque de la substance blanche. La figure 5-a, montre que le CSR atteint sa valeur maximale pour la méthode spFOD. On note aussi que sur ces données HARDI le CSR est plus important pour les méthodes par décomposition de tenseur, Parafac et AdecompSHOT, par comparaison aux méthodes traditionnelles,  $CSD$  et ZeigVals, cela indique que le paramètre NC est plus faible pour les méthodes par décomposition de tenseur suggérant un meilleur alignement et détection des maxima.

Par ailleurs, on retrouve une certaine cohérence entre les résultats obtenus par une tractographie déterministe (figure 5-a) et ceux obtenus par une tractographie probabiliste (figure 5-b). Cependant, nous remarquons que pour toutes les méthodes évaluées, les algorithmes déterministes rendent de meilleurs résultats que les algorithmes probabilistes en termes de précision de la connectivité, cela peut-être dû à la structure plutôt droite des faisceaux simulés, ce qui constitue un avantage pour la tractographie déterministe. Cela est cohérent avec les résultats obtenus par Girard et collègues [16].

Les résultats montrés en figure 5 sont en cohérence et confirment les conclusions établies auparavant dans la littérature [19, 12, 7, 10] sur la base seule de la précision angulaire et non des résultats de tractographie comme ici. En 2015, L. Ning et ses collaborateurs ont publié les résultats d'un challenge de reconstruction des fibres multiples [26] où, l'évaluation des méthodes s'est faite sur le critère de la précision angulaire. Les auteurs ont

conclu que sur des données HARDI de 60 directions et d'un b-value de  $2000s/mm^2$  avec un rapport SNR entre 11 et 13 [26], les méthodes  $CSD$  d'ordre 8 sont très précises en commettant une erreur angulaire très faible par rapport à la réalité terrain, de l'ordre de  $3^\circ$  environ, la méthode spFOD quant à elle commet une erreur angulaire de l'ordre de  $10^\circ$ .

Nous proposons ici, de quantifier les résultats produits par ces deux méthodes sur la tractographie en utilisant des données HARDI bruitées [22, 23]. A noter que l'ensemble de données [22, 23] utilisé dans notre étude est différent de celui utilisé par L. Ning et ses collaborateurs [26]. Ainsi, nous avons corrompu notre ensemble de données HARDI (de 60 directions de gradient avec un b-value de  $3000s/mm^2$ ) en y ajoutant un bruit Ricien avec un SNR de 20 puis de 10, nous avons ensuite, refait notre expérience avec les méthodes spFOD et  $CSD_8$ . Les résultats sont résumés en figures 6 et 7. Ces figures, montrent que les deux méthodes  $CSD_8$  et spFOD se comportent plutôt bien et produisent des résultats comparable avec un léger avantage pour la méthode spFOD. En effet, que ce soit avec un SNR de 20 ou de 10, une tractographie déterministe ou probabiliste, la méthode spFOD présente un rapport VCCR, une moyenne ABC et un rapport CSR toujours plus élevés que ceux de la méthode  $CSD_8$ .

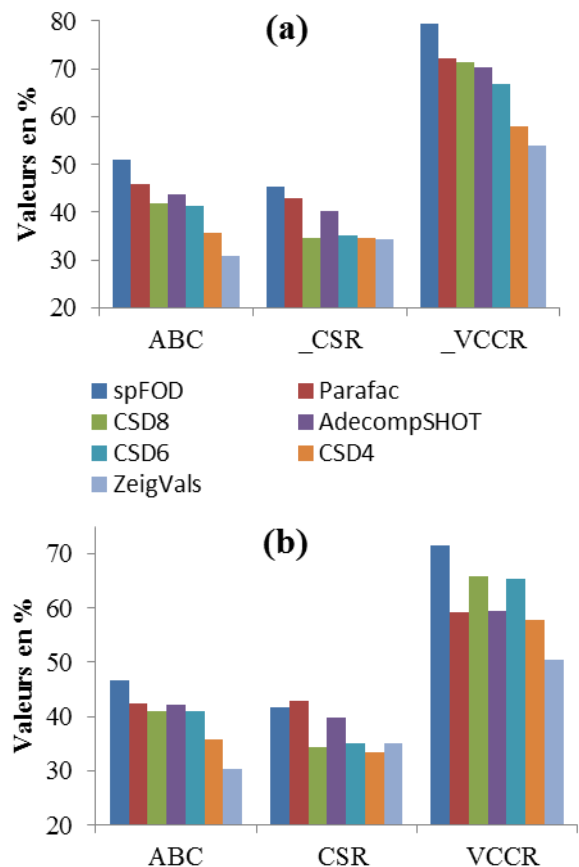


Figure 5: Données HARDI non bruitées, de 60 directions de gradient: résultats obtenus par l'utilisation des différentes méthodes d'extraction des maxima. (a) résultats d'une tractographie déterministe et (b) résultats pour une tractographie probabiliste.

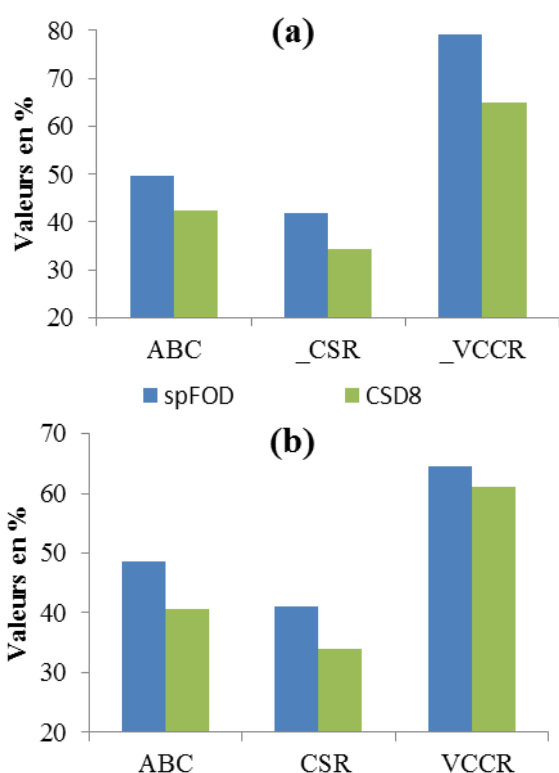


Figure 6: Données HARDI de 60 directions de gradient, avec SNR =20 : résultats obtenus par l'utilisation des méthodes CSD8 et spFOD. (a) résultats d'une tractographie déterministe et (b) résultats pour une tractographie probabiliste.

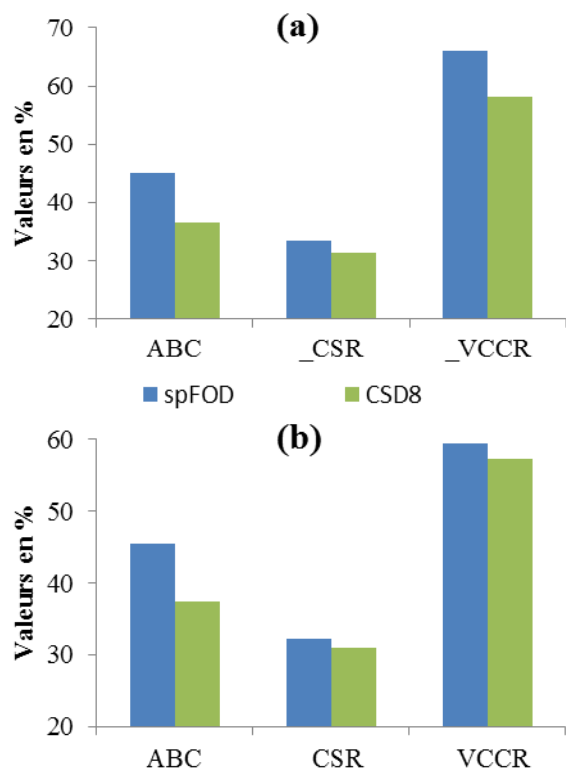


Figure 7: Données HARDI de 60 directions de gradient, avec SNR=10 : résultats obtenus par l'utilisation des méthodes CSD8 et spFOD. (a) résultats d'une tractographie déterministe et (b) résultats pour une tractographie probabiliste.

La particularité et l'avantage de la méthode spFOD réside dans sa capacité à reconstruire correctement les orientations des faisceaux de fibres multiples avec peu de directions de gradient [10, 26]. Afin de valider la performance de la méthode spFOD à basse résolution angulaire, nous avons reconduit notre expérimentation en utilisant un ensemble de données acquis avec seulement 30 directions de gradient et un b-value de 1200s/mm<sup>2</sup>. Nous avons évalué dessus la méthode spFOD et nous l'avons comparé à d'autres méthodes de l'état de l'art qui agissent à basse résolution angulaire, à savoir : Parafac, AdecompSHOT, CSD<sub>4</sub> et le traditionnel tenseur de diffusion DTI. Les tests ont été menés sur des données sans bruit, puis bruitées avec des SNR de 20 et de 10.

**Acquisitions à basse résolution angulaire :** La figure 8 montre les résultats obtenus par l'analyse de la connectivité reconstruite à partir des orientations locales extraites par les méthodes citées ci-dessus, en utilisant un ensemble de données non bruitées de 30 directions de gradient et d'un b-value de 1200 s/mm<sup>2</sup>. Les résultats obtenus par la tractographie déterministe sont résumés dans la figure 8-a et ceux obtenus par la tractographie probabiliste sont illustrés sur la figure 8-b. D'une part, les paramètres VCCR, CSR et ABC confirment que le modèle DTI est effectivement le modèle le moins performant, cela est dû à son incapacité à détecter les croisements de fibres. D'autre part, ils mettent en évidence la performance de la méthode spFOD, en effet, cette méthode présente toujours les paramètres VCCR, CSR et ABC les plus élevés. La méthode Parafac suit de près la méthode spFOD, cependant, cela doit être interprété prudemment. En effet, la technique Parafac requiert de fixer a priori le rang à une valeur égale à deux, ce rang est équivalent au nombre de faisceaux qui se croisent dans un voxel, et comme le phantom que nous utilisons est construit avec une très grande proportion de croisements de deux faisceaux, dans ce cas, l'information a priori requise par Parafac constitue un réel avantage. Aussi, nous constatons à travers la figure 8 que sur des données à basse résolution angulaire les méthodes AdecompSHOT et CSD d'ordre 4 produisent des résultats comparables. La méthode spFOD quant à elle, est libre de tout a priori et, elle arrive avec 30 directions, à produire une connectivité aussi précise que celle obtenue avec des données HARDI à 60 directions. Cependant, cette méthode semble être plus sensible au bruit avec 30 directions qu'avec 60 directions. Effectivement, avec 60 directions et lorsqu'on ajoute un bruit d'un SNR de 20 (figure 6), le paramètre VCCR chute seulement de 0,4% alors qu'il chute de 14,8% (figure 9) pour 30 directions. Dans le cas d'un SNR de 10, la baisse de performance est de 13,5% pour 60 directions (figure 7) contre 24,5% pour 30 directions (figure 10). Toutefois, la méthode spFOD reste relativement robuste par rapport à la méthode CSD, car pour un même algorithme de tractographie déterministe, en utilisant des données HARDI de 60 directions de gradient bruitées avec un SNR de 20 le CSD<sub>8</sub> à un rapport VCCR de 64,9 % tandis que le spFOD réalise pour le même SNR un VCCR comparable de 65% avec seulement 30 directions de gradient.

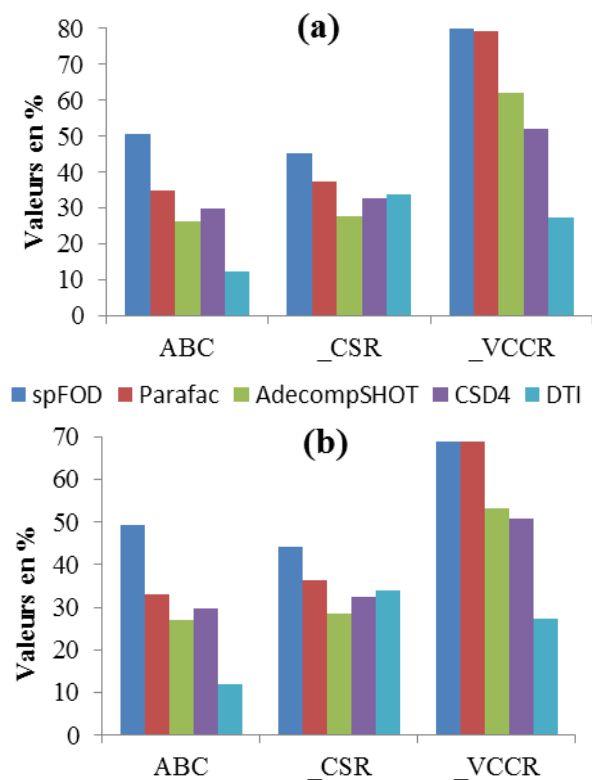


Figure 8: Données de diffusion non bruitées, de 30 directions de gradient: résultats obtenus par l'utilisation des différentes méthodes d'extraction des maxima. (a) résultats d'une tractographie déterministe et (b) résultats pour une tractographie probabiliste.

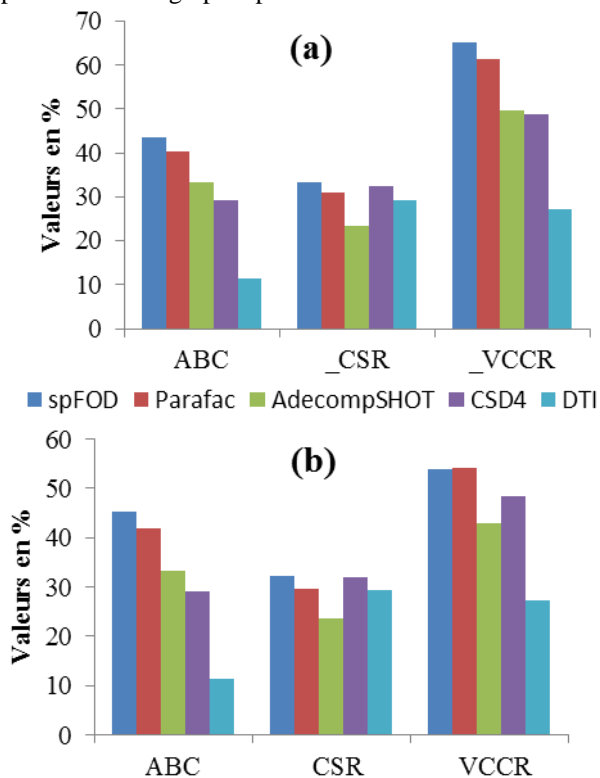


Figure 9: Données de diffusion, de 30 directions de gradient, avec SNR=20: résultats obtenus par l'utilisation des différentes méthodes d'extraction des maxima. (a) résultats d'une tractographie déterministe et (b) résultats pour une tractographie probabiliste.

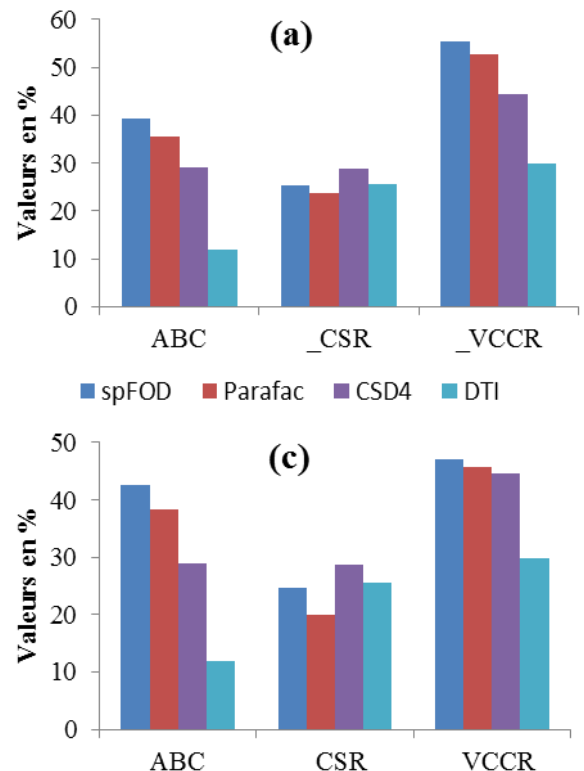


Figure 10: Données de diffusion, de 30 directions de gradient, avec SNR=10: résultats obtenus par l'utilisation des différentes méthodes d'extraction des maxima. (a) résultats d'une tractographie déterministe et (b) résultats pour une tractographie probabiliste.

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les résultats d'un travail de validation et de comparaison des méthodes d'extraction des maxima. Ces méthodes ont été évaluées et comparées sur la base de la précision de la connectivité qui en résulte. Pour tirer des conclusions pertinentes, nous avons mené nos expérimentations sur des données HARDI à 60 directions de gradient et aussi sur des données à basse résolution angulaire de 30 directions de gradient. De plus, ces données ont été corrompues par un bruit Ricien avec un SNR de 20 et de 10. A travers cette étude nous tirons les deux conclusions suivantes : 1- Avec des données HARDI la connectivité peut être aussi bien reconstruite en utilisant chacune des méthodes spFOD, CSD<sub>8,6</sub>, Parafac et AdecompSHOT, avec un petit avantage à la méthode spFOD qui présente la proportion de connexion valides par rapport à l'ensemble des connexions, la plus élevée. 2- Avec une acquisition de seulement 30 directions de gradient, grâce à la méthode spFOD il est désormais possible d'obtenir une connectivité aussi précise que celle qu'on pourrait obtenir avec 60 directions de gradient. Si les résultats obtenus par le Tractometer étaient directement transférables à des données in vivo, cela serait exceptionnel en clinique en permettant d'obtenir avec un examen IRM de diffusion, court d'aussi bons résultats que ceux d'un examen plus long.

## Bibliographie

- [1] D. Le Bihan, et E. Breton, Imagerie de diffusion in vivo par résonance magnétique nucléaire, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* 93.5, pp. 27–34, 1985.
- [2] P. Basser, J. Mattiello, D. Le Bihan, Estimation of the effective self-Diffusion tensor from the NMR spin echo, *Journal of Magnetic Resonance* Vol. 103, pp. 247-254, 1994.
- [3] V. J. Wedeen, R. P. Wang, J. D. Schmahmann, T. Benner, et al, Diffusion spectrum magnetic resonance imaging (DSI) tractography of crossing fibers. *Neuroimage*, 41, pp.1267-1277, 2008.
- [4] DS. Tuch, Q-ball imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 52, n°6, pp. 1358-1372, 2004.
- [5] E. Caruyer, C. Lenglet, G. Sapiro & R. Deriche, Design of multishell sampling schemes with uniform coverage in diffusion MRI. *Magnetic resonance in medicine*, 69(6),1534–40, 2013.
- [6] J.-D. Tournier, F. Calamante, A. Connelly, Robust determination of the fibre orientation distribution in diffusion MRI: non-negativity constrained super-resolved spherical deconvolution. *NeuroImage* 35 (4), 1459–1472, 2007.
- [7] T. Megherbi, M. Kachouane, F. Oulebsir-Boumghar, and R. Deriche, Crossing Fibers Detection with an Analytical High Order Tensor Decomposition, *T. Computational and Mathematical Methods in Medicine (CMMM) Volume 2014*, Article ID 476837, 18 pages, 2014.
- [8] T. Megherbi, M. Kachouane, F. Oulebsir Boumghar, R. Deriche. Détection des croisements de fibre en IRM de diffusion par décomposition de tenseur : Approche analytique. *Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA)*, France. 2014.
- [9] M. Laouchedi, T. Megherbi et al., ODF maxima computation using hill climbing algorithm, In *International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, Beijing, pp. 722-725, 2014.
- [10] A. Ghosh, T. Megherbi, F.O Boumghar, and R. Deriche, Fiber orientation distribution from non-negative sparse recovery. In *International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI): From Nano to Macro*, San Francisco, CA, 2013.
- [11] L., Bloy, R., Verma, On computing the underlying fiber directions from the diffusion orientation distribution function. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, vol. 11, pp. 1–8, 2008.
- [12] F. Jiao, Y. Gur, C. R. Johnson, and S. Joshi, Detection of crossing white matter fibers with high-order tensors and rank-k decompositions, in *Information Processing in Medical Imaging*, vol. 6801 of LNCS, pp. 538–549, 2011.
- [13] I. Aganj, C. Lenglet, G. Sapiro, ODF Maxima Extraction in Spherical Harmonic Representation via Analytical Search Space Reduction. *MICCAI* (2), pp. 84-91, 2010.
- [14] M., Descoteaux, R. Deriche, T.R. Knösche, and A. Anwander, Deterministic and probabilistic tractography based on complex fibre orientation distributions. *IEEE Trans. Med. Imaging* 28 (2), 269–286, 2009.
- [15] A., Ghosh, E., Tsigaridas, B., Mourrain, R., Deriche, A polynomial approach for extracting the extrema of a spherical function and its application in diffusion MRI. *Med. Image Anal.* 17 (5), pp. 514-503, 2013.
- [16] G. Girard, K. Whittingstall, R. Deriche, M. Descoteaux, Towards quantitative connectivity analysis: reducing tractography biases. *Neuroimage* 98, pp. 266–278, 2014.
- [17] M. Descoteaux, E. Angelino, S. Fitzgibbons, R. Deriche, A Fast and Robust ODF Estimation Algorithm in Q-Ball Imaging *International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI): From Nano to Macro*, pp. 81-84, 2006.
- [18] Y. T. Weldeselassie, A. Barmpoutis, and M. Stella Atkins, Symmetric positive semi-definite cartesian tensor fiber orientation distributions (CT-FOD), *Medical Image Analysis*, vol. 16, no. 6, pp. 1121–1129, 2012.
- [19] T. Megherbi, A. Ghosh, F. Oulebsir Boumghar, and R. Deriche, Détection des croisements de fibres en IRM de Diffusion, in *Proceedings of the 3rd International Conference on Image and Signal Processing and Their Applications (ISPA)*, Mostaganem, Algeria, 2012.
- [20] T. Megherbi, A. Ghosh, F. Oulebsir Boumghar, R. Deriche, Fiber Orientation Distribution from Non-Negative Sparse Recovery, *MICCAI Workshop on Computational diffusion MRI*, Boston, United States. 2014.
- [21] M. Descoteaux, High Angular Resolution Diffusion MRI: From Local Estimation to Segmentation and Tractography. PhD thesis, Université de Nice - Sophia Antipolis, February 2008.
- [22] E. Caruyer, A. Daducci, M. Descoteaux, J.-C. Houde et al, Phantoms: a flexible software library to simulate diffusion MR phantoms. *International Symposium on Magnetic Resonance in Medicine (ISMRM)*, 2014.
- [23] A. Daducci, E. Caruyer, M. Descoteaux et al, *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) Reconstruction Challenge*, San Francisco, CA, 2013.
- [24] *Proceeding of IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) Reconstruction Challenge*, San Francisco, CA, 2013.
- [25] M.-A. Côté, G. Girard, A. Boré, E. Garyfallidis, J.-C. Houde, M., Descoteaux, Tractometer: towards validation of tractography pipelines. *Med. Image Anal.* 17 (7), pp. 857-844, 2013.
- [26] L. Ning, F. Laun, Y. Gur, E. V.R. Dibella, S. Deslauriers-Gauthier, et al., Sparse Reconstruction Challenge for diffusion MRI: Validation on a physical phantom to determine which acquisition scheme and analysis method to use?. *Medical Image Analysis*, 26, pp.316-331, 2015.
- [27] J.-D. Tournier, F. Calamante and A. Connelly, MRtrix: Diffusion tractography in crossing fiber regions. *Int. J. Imaging Syst. Technol.*, 22, pp. 53–66; 2012.