

## ANATOMY / ANATOMIE

## LES TECHNIQUES ACTUELLES D'ÉTUDE DE L'ANATOMIE DE LA SUBSTANCE BLANCHE DU SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

## CURRENT TECHNICS IN THE STUDY OF THE ANATOMY OF THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM WHITE MATTER

N'DRI OKA Dominique <sup>1</sup>  
ADOU Nicole <sup>1</sup>  
KOUAKOU Koffi Fulbert <sup>1</sup>  
VELUT Stéphane <sup>2</sup>

1. Service de Neurochirurgie, CHU de Yopougon 21 BP 632 Abidjan 21 Côte d'Ivoire
2. Laboratoire d'anatomie Faculté de Médecine Université François Rabelais, Tours, France

E-Mail Contact - N'DRI OKA Dominique : [ndriokad \(at\) yahoo \(dot\) fr](mailto:ndriokad@yahoo.fr)

*Mots clés : Anatomie, Technique de Klingler, Tractographie, Substance blanche*  
*Keywords: Anatomy, Klingler's methods, Tractography, Central nervous system, white matter*

## RESUME

L'étude des fibres de la substance blanche de l'encéphale demeure complexe. Pour ce faire plusieurs méthodes ont été utilisées pour mieux comprendre la disposition de la micro anatomie de ces fibres. La technique de dissection des fibres ex vivo fût la première technique. Elle a ensuite été abandonnée au profit du microtome et de l'histologie du fait des difficultés pratiques engendrées. C'est à partir de 1956 qu'elle a connu un regain d'intérêt avec son amélioration par Josef Klingler. A partir des années 2000 alors que la technique continue d'être améliorée, une autre technique de dissection in vivo est mise au point. Les méthodes de d'étude de la substance blanche de l'encéphale se résument à la dissection selon la technique de Klingler et la tractographie réalisée par l'IRM en tenseur de diffusion.

## ABSTRACT

The study of the central nervous white matter remains a difficult subject. Many techniques have been used to dissect the white matter pathways. In 1956 Josef Klingler improved the white matter fibers dissection technique. His work developed in 2000 was summarized in a new atlas in vivo white matter fiber dissection called tractography. Current technique is based on Klingler's methods and tractography using MRI tensor diffusor

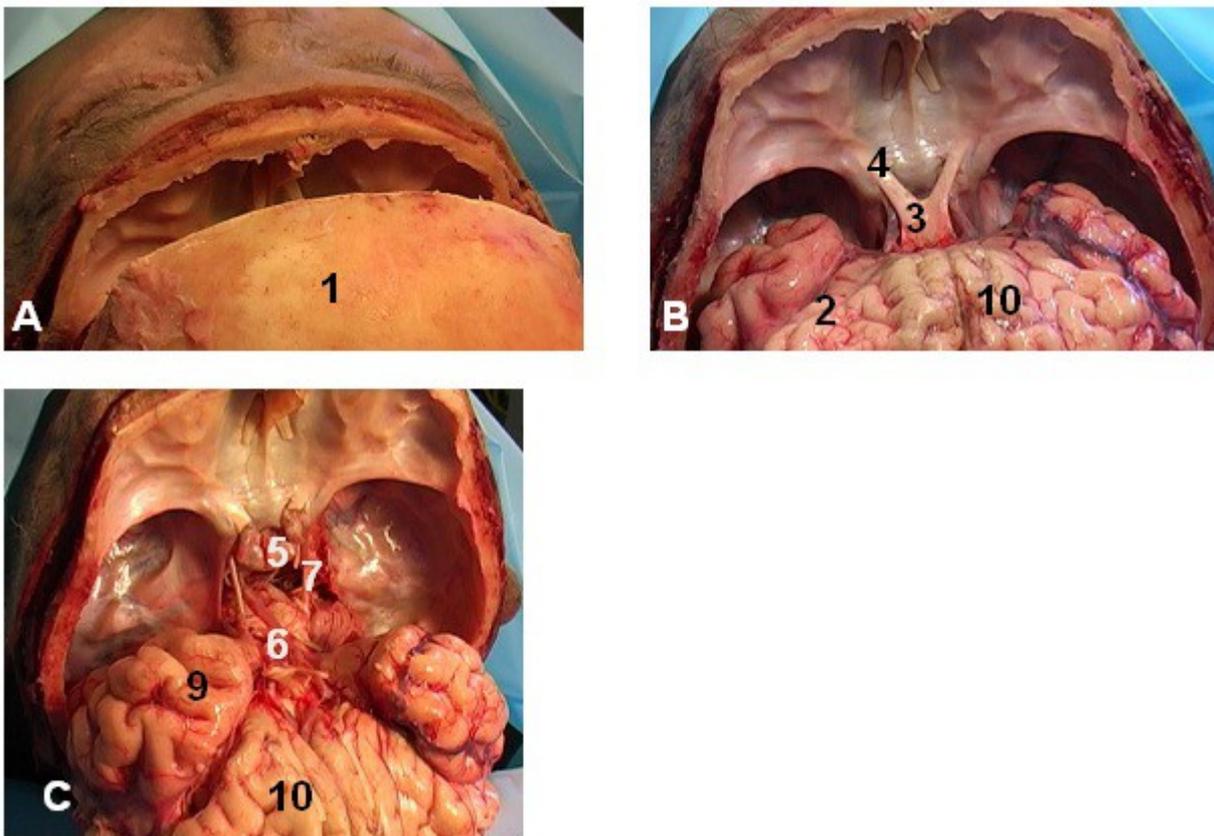
## INTRODUCTION

L'anatomie de la substance blanche plus particulièrement celle de l'encéphale demeure complexe. Son étude a connu divers époque qui sont la technique de dissection des fibres, l'histologie et le microtome, la technique de Klingler et actuellement la dissection in vivo par l'IRM en tenseur de diffusion. Les méthodes récentes d'étude se résument a la méthode de Klingler et à la tractographie réalisée par l'IRM en tenseur de diffusion Aussi le présent travail qui a un objectif didactique se propose d'exposer ces deux méthodes d'étude et d'en discuter les caractéristiques communes.

## TECHNIQUE DE DISSECTION SELON KLINGLER [7]

### 1.1/Technique de prélèvement

L'encéphale était prélevé moins de 36 heures après le décès (Figure 1) et aussitôt immergé dans l'eau. Le prélèvement s'est fait sur un sujet installé en position de décubitus dorsal. Après la réalisation d'un scalp, l'on découpait la voûte crânienne à l'aide d'une scie à plâtre. L'enveloppe durale était ensuite découpé surtout celle de la base. A ce stade l'ensemble de l'encéphale restait solidaire de la base du crâne du fait du tronc cérébral de l'artère basilaire et des nerfs crâniens surtout le nerf optique et le chiasma. Ces différentes structures anatomiques sont ensuite sectionnées et l'encéphale fût recueilli dans une bassine remplie d'eau.



**Figure 1**

Etape de prélèvement de l'encéphale en vue d'une étude selon la technique de Klingler

Stage of encephalon removing according to Klingler's technics

### 1.2/ Méthode de conservation [7]

La fixation s'effectuait immédiatement dans une solution formolée à 5 %, dans laquelle l'encéphale était suspendu par une ficelle nouée à l'artère basilaire. Cette suspension préservait la morphologie de l'encéphale en évitant un contact avec le fond du cristallin. Les bains ont été renouvelés à un rythme hebdomadaire durant 3 mois jusqu'à l'obtention d'un parenchyme encéphalique ferme mais non dur. Après lavage à l'eau courante, les encéphales étaient ensuite congelés à 15° durant 3 à 5 jours dans un réfrigérateur. Ils sont ensuite disséqués et conservés dans une solution de formol à 5 % (Figure 2). Après cette préparation, la substance grise devenait spongieuse et les faisceaux de substance blanche s'individualisaient.

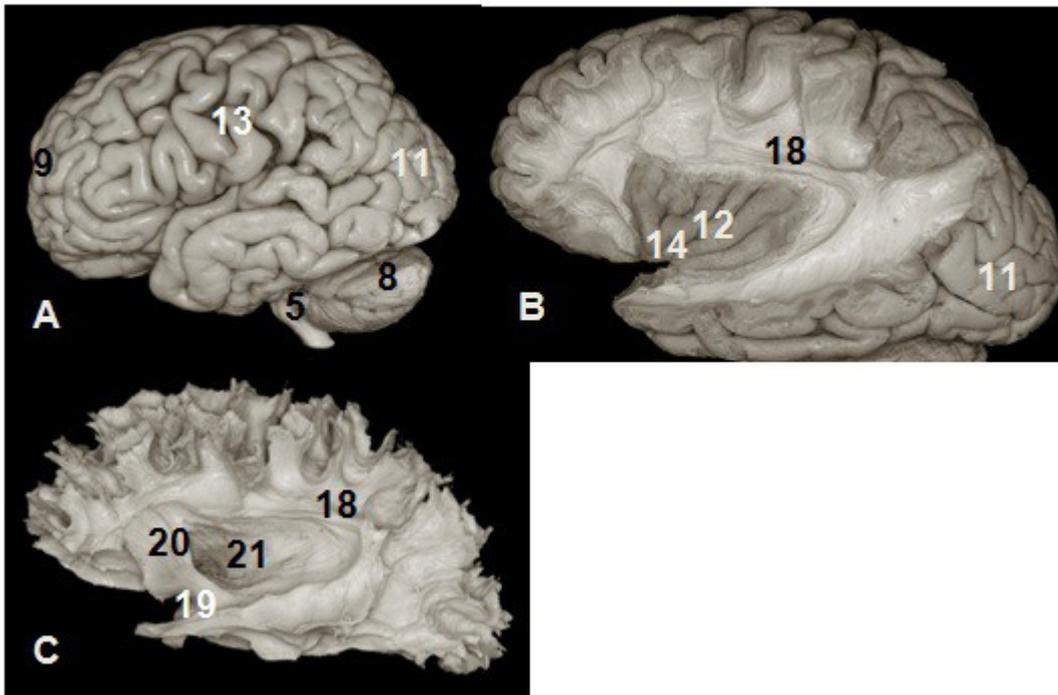


**Figure 2**

Conservation du l'encéphale dans un bocal entre les séances de la dissection selon la technique de Klingler  
Preservation of the brain between the steps of the dissection according to Klingler's technics

### 1.3/ Technique de dissection selon Klingler [7]

Le cortex était réséqué à la curette et les faisceaux blancs sous jacents pouvaient être progressivement suivis en les pelant sous microscope opératoire Zeiss OPMI 9FC Oberkechen Germany. Une fois qu'un faisceau était isolé, des mensurations étaient réalisées (notamment la longueur et la distance par rapport à d'autres structures cérébrales). Les photographies des étapes successives de la dissection étaient réalisées. Le cortex cérébral était retiré à l'œil nu au sommet des gyri ou sous microscope au fond des sillons à l'aide de curettes et de spatules. L'ablation du cortex cérébral exposait les fibres courtes d'association en "U" qui relie deux gyri adjacents. Les différents faisceaux de la substance sub corticale pouvaient alors être étudiés. L'exérèse progressive des fibres arquées des opercules fronto-orbitaire, fronto- pariétal et temporal exposait l'insula (Figures 3).



**Figures 3**

Dissection selon la technique de Klingler dissection (Dr N'Dri Oka, Master recherche 2005 Tours and Paris) (7)

Dissection according to Klingler's technics (Dr N'Dri Oka)

## 2/ Tractographie réalisée par une IRM en tenseur de diffusion

La méthode est basée sur la propriété fortement anisotrope de la substance de l'encéphale.

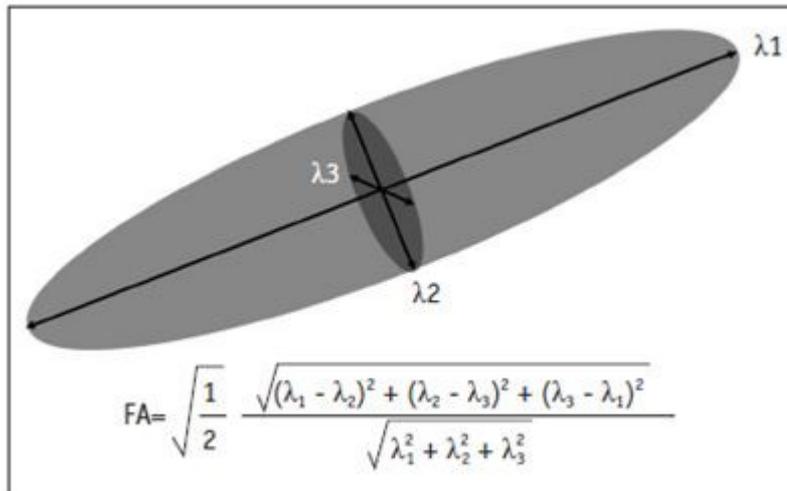
Elle est basée sur le fait que la direction des molécules traduit l'orientation des tractus. Par définition l'anisotropie est le fait que la structure ici la substance blanche de l'encéphale n'a pas le comportement dans les trois dimensions dans l'espace. L'isotropie est le contraire de l'anisotropie.

### 2.1/Base mathématique et physique [3, 4,8]

Les molécules diffusent spontanément en fonction du gradient de concentration du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré, ce qu'exprime la première loi de Fick :  $J_x = -D_x \frac{dC}{dx}$  où  $J_x$  représente le flux moléculaire macroscopique selon  $Ox$  par unité de surface,  $D_x$  le coefficient de diffusion dans la direction  $Ox$ , à une température donnée et pour un milieu donné, et  $dC/dx$  la variation de concentration. Cependant, au sein d'un milieu homogène ( $dC/dx = 0$ ), il se manifeste aucun flux macroscopique, et seule une approche statistique des flux microscopiques liés aux mouvements browniens peut être développée. Au sein de l'axoplasme, les molécules d'eau se déplacent plus facilement et plus rapidement parallèlement à la trajectoire de l'axone plutôt que perpendiculairement à celui-ci en raison de la présence imperméabilisante de la membrane plasmique et de la gaine de myéline.

## 2.2/Tenseur de diffusion

Un tenseur est une forme algébrique multilinéaire qui généralise la notion de vecteur et peut se présenter comme une matrice à  $i$  colonnes et  $j$  lignes. La structure cellulaire ou tissulaire peut imposer des coefficients de diffusion différent dans les trois dimensions de l'espace :  $D_{XX} \neq D_{YY} \neq D_{ZZ}$ . Dans un repère propre permettant de supprimer les éléments non diagonaux. Le tenseur se réduit à une matrice diagonale dont les éléments non nuls se confondent avec les valeurs propres :  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$  et le repère propre associé est engendré par trois vecteurs  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$  et  $\vec{e}_3$ . DXX étant la valeur scalaire du coefficient de diffusion le tenseur  $D_{ij}$  à neuf composante (un tenseur est une forme algébrique multilinéaire qui généralise la notion de vecteur) on peut écrire que  $D_{ij} \vec{e}_j = \lambda_i \vec{e}_i$  suivant :

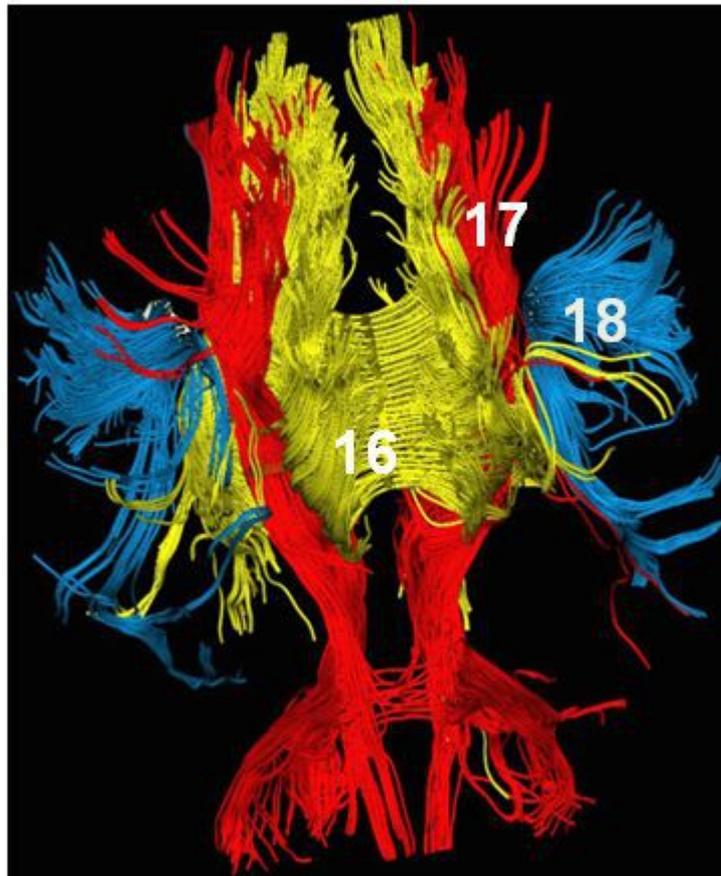


**Figure 4**

(Formule mathématique permettant de calculer la fraction d'anisotropie [3,4])

## 2.3/Diffusion et faisceaux neuro-anatomiques [5,8]

La réalisation de la tractographie nécessite une acquisition sur un appareil d'IRM développant un champ magnétique de 3 teslas. La substance blanche de l'encéphale est fortement anisotrope c'est-à-dire qu'elle n'a pas les mêmes comportements biomécaniques dans les trois directions de l'espace. L'axe principal du repère propre de la fibre nerveuse, attaché à la plus grande valeur propre sera aligné sur la trajectoire locale de l'axone, et les deux autres axes. La diffusion globale d'un certain volume d'un faisceau donné dépendra du nombre de fibre, leur diamètre, de leur structure interne, de leur degré de myélinisation de parallélisme et de leur topographie.



**Figure 5**

Légendes

- 1 : voûte
- 2 : encéphale
- 3 : chiasma optique
- 4 : nerfs optiques
- 5 : tronc cérébral
- 6 : artère basilaire
- 7 : Nerfs mixtes
- 8 : cervelet
- 9: Lobe temporal
- 10 : Lobe frontal
- 11:Lobe occipital
- 12 : l'insula
- 13 : sillon central
- 14 : limen insulae
- 15 : cingulum
- 16: corps calleux
- 17 : tractus pyramidal
- 18 : faisceaux longitudinal supérieur
- 19 : faisceau unciné
- 20 : faisceau occipito-frontal inférieur
- 21 : capsule interne

### 3/ DISCUSSION

#### 3.1/ Implications de la méthode de Klingler à l'IRM en tenseur de diffusion

Il s'agit d'une technique ancienne d'étude des fibres de la substance blanche de l'encéphale qui a été améliorée par Klingler qui en produisit un atlas [6]. La tractographie réalisée après l'IRM en devait être validée par la technique de Klingler qui connaît elle-même des améliorations au cours des années. Une étude de corrélation des données des deux méthodes de dissection des fibres blanches encéphaliques semble de réalisation difficile. Dans la mesure où la tractographie repose sur des bases mathématiques et physiques fiables, sa validation s'impose d'elle-même. La tractographie exploite l'hétérogénéité de la vitesse de déplacement des molécules d'eau selon les directions de l'espace. La substance blanche encéphalique est un tissu fortement anisotrope. Cette tractographie repose sur la mesure du degré d'anisotropie des fibres de la substance blanche et donc sur leur organisation micro structurale. Nos constatations anatomiques nous amènent à relever des points communs aux deux méthodes [7]. Ces deux méthodes permettent une étude tridimensionnelle des faisceaux de la substance blanche. La tractographie, comme la méthode de Klingler, repose sur le comportement des molécules d'eau existant entre les axones. Pour la méthode de Klingler c'est la formation de glace entre les axones qui facilite leur dissection. Dans la tractographie, c'est le déplacement et donc l'orientation préférentielle des mouvements des molécules qui permet de faire la dissection des fibres de la substance blanche. Dans la tractographie comme dans la méthode de Klingler des zones de croisement des faisceaux sont de dissection difficile. Les deux techniques ne permettent pas de faire une étude des rapports vasculaires. Toutefois la technique de Klingler permet d'étudier la substance grise (cortex cérébral et les noyaux gris centraux). La méthode de Klingler va peut être permettre de comprendre la tractographie, elle-même appelée à se développer. De plus, la tractographie rencontre encore des problèmes de reproductibilité, de comparabilité des résultats et de correction des artefacts. Ceci rend parfois incertain l'origine, les embranchements et la terminaison des faisceaux. La tractographie est non invasive et est réalisée in vivo et peut être réalisée en per opératoire. Cependant certaines données de l'IRM en tenseur de diffusion méritent d'être vérifiées par des dissections selon la technique de Klingler.

#### 3.2/Implications de la méthode de Klingler

- ▶ La validation de la méthode de la tractographie réalisée par l'IRM en tenseur de diffusion.
- ▶ L'apprentissage de l'anatomie de la substance blanche du système nerveux
- ▶ L'entraînement des jeunes neurochirurgiens aux méthodes de dissection en neurochirurgie.

#### 3.3./Implications de la méthode de tractographie réalisée par l'IRM en tenseur de diffusion

Alors que la dissection par la méthode de Klingler se limite au tronc cérébral, la tractographie peut permettre d'étudier la moelle spinale. La tractographie permet d'étudier le retentissement des lésions vasculaire, dégénérative [9], tumorale et infectieuse sur la moelle spinale [3]. Elle peut être utile à la réparation des lésions traumatiques de la moelle spinale [1, 9 -11] et peut être utilisée à planifier le geste chirurgical [4,8]

### CONCLUSION

Ces deux méthodes d'étude sont complémentaires puisque la technique plus ancienne va permettre de valider la tractographie réalisée par l'IRM en tenseur de diffusion .avec l'avènement de l'IRM en tenseur de diffusion, de nouvelles technique de dissection de la substance blanche ont été décrite ; en faite l'IRM en tenseur de diffusion dont les fondements sont basés sur des bases mathématiques et physiques assez fiable va s'imposer comme la méthode de choix pour mieux étudier les fibres de la substance.

#### Remerciements

Nous tenons à dire merci aux professeurs Stéphane Velut, Christophe Destrieux (laboratoire d'anatomie de Tours), Johann Peltier (laboratoire d'Anatomie d'Amiens) Jean Philippe Cottier et Monsieur Daniel Bountry du laboratoire de multimédia de l'université François Rabelais de Tours. Nous remercions aussi tous les auteurs des iconographies disponibles sur internet non référencées mais qui nous servi dans ce travail dont le principal but est d'être dictactique pour l'apprentissage de l'anatomie de la substance blanche de l'encéphale

---

Conflit d'intérêt	Aucun
-------------------	-------

## REFERENCES

1. DUCREUX D, LACOUR MC, CAZEJUST J, BENOUDIBA F, SARRAZIN JL. La moelle et les racines traumatiques : imagerie dans la prise en charge aiguë et chronique. J Radiol. 2010;91:1010-21
1. COTTIER J-P , BARANTIN L, DESTRIEUX C , WANG R, DOMENGIE F, HERBRETEAU D, HALGREN E. Imagerie cérébrale en tenseur de diffusion et tractographie de la substance blanche : principes et limites actuelles Feuillet de Radiologie 45(3, Part 1) : 2005, 191-199
2. FACONA D, OZANNE A, FILLARD P , LEPEINTRE J-F, TOURNOUX-FACONC C, DUCREUX D. MR Diffusion Tensor Imaging and Fiber Tracking in Spinal Cord Compression AJNR Am J Neuroradiol. 2005;26:1587-1594
3. HABAS C : Fondements physiques élémentaires de la tractographie en tenseur de diffusion. J. Radiol, 2004;85:281-286
4. LE BIHAN D, MANGIN JF, POUPON C, CLARK CA, PAPPATA S, MOLKO N, et al. Diffusion tensor imaging: concepts and applications. J Magn Reson Imaging 2001;13:534-46.
5. LUDWIG E, KLINGLER J. atlas cerebri humani. Basel, S. Karger, 1956.
6. N'DRI OKA D. Micro-anatomie de la substance blanche du gyrus frontal : implications a l'IRM en tenseur de diffusion. Mémoire de Master recherche science de la vie et de la santé PARIS, 2005.
7. OPPENHEIM C, RODRIGO S, POUPON C, DUMAS DE ROQUE A, NAGGARA O, MEDER JF, FEERDY D. Imagerie en tenseur de diffusion et système nerveux central. Pour quelles applications cliniques ? J. Radiol. 2004 ; 85:287-96
8. RAJASEKARAN S, YERRAMSHETTY JS , CHITTODE VS , KANNA RM, BALAMURALI G , SHETTY AP. The assessment of neuronal status in normal and cervical spondylotic myelopathy using diffusion tensor imaging. Spine 2014;39 (15):1183 - 1189
9. RAO JS, ZHAO C, YANG ZY, LI SY, JIANG T, FAN YB, LI XG. DIFFUSION tensor tractography of residual fibers in traumatic spinal cord injury: a pilot study. JNeuroradiol. 2013;40(3):181-186.
10. TSUCHIYA K, FUJIKAWA A, HONYA K, NITATORI T, SUZUKI Y. Diffusion tensor tractography of the lower spinal cord. Neuroradiology. 2008 ;50(3):221-5.