HAL
open science

Extraction et étude statistique du sillon calcarin

Jean-Marie Favreau, Cybèle Ciofolo, Christian Barillot

To cite this version:

Jean-Marie Favreau, Cybèle Ciofolo, Christian Barillot. Extraction et étude statistique du sillon calcarin. MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC, IRISA – IETR – LTSI, Nov 2005, Rennes, pp.423-426. inria-00000830

HAL Id: inria-00000830

https://inria.hal.science/inria-00000830

Submitted on 22 Nov 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Extraction et étude statistique du sillon calcarin

Jean-Marie Favreau*, Cybèle Ciofolo, Christian Barillot
IRISA/CNRS, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France
jean-marie.favreau@irisa.fr

Résumé : Un des objectifs de la neuroimagerie est de réaliser l'étude des structures cérébrales de sujets sains ou pathologiques. La grande variabilité des structures nécessite la mise en place de méthodes d'études spécifiques, souvent abordées par le biais de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). L'étude du sillon calcarin, élément anatomique notable des aires visuelles du cerveau, constitue un point délicat. En effet sa segmentation est compliquée d'une part par sa localisation sur le plan inter-hémisphérique, mais aussi par sa profondeur et sa forme complexe. On se propose de réaliser l'extraction de ce sillon en commençant par opérer une segmentation sélective des deux hémisphères. Cette première segmentation permet de ne travailler que sur un volume restreint à l'hémisphère qui nous intéresse. On utilise alors la méthode du *ruban actif* pour extraire la surface médiane du sillon. La forme des sillons calcarins est hautement variable en fonction des individus. Nous avons mis en place une modélisation statistique à base d'un ensemble d'apprentissage. Cela peut permettre la mise en place d'algorithmes de recalage basés sur des marqueurs anatomiques, en vue de l'étude des aires visuelles du cerveau.
Mots-clés : Bio-informatique, Imagerie médicale, neuroimagerie, segmentation, sillon calcarin

1 INTRODUCTION

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) constitue l'une des méthodes clés de l'acquisition des informations anatomiques du cerveau. Parmi ces informations, les sillons forment les composantes macroscopiques les plus notables de la surface corticale et apportent des informations précieuses dans le cadre d'une étude des activités fonctionnelles du cerveau. Plusieurs études soulignent par exemple les correspondances des localisations des principales aires fonctionnelles avec ces structures anatomiques. Ainsi, les aires visuelles du cerveau, étudiées dans [Warnking, 2002], parcourent la surface corticale et sont distribuées de part et d'autre du sillon calcarin (voir FIG. 1). Différents travaux proposent des approches générales à l'extraction des sillons (par exemple [Le Goualher, 1999], ou [Vaillant, 1996]). Cependant ces méthodes sont difficilement applicables directement dans le cas d'une étude du sillon calcarin, car sa localisation inter-hémisphérique rend son extraction ardue.

Cet article présente une méthode complète de segmentation des sillons calcarins, tout d'abord en décrivant l'étape de segmentation sélective préliminaire, puis l'extraction des sillons calcarins sur chacun des sujets. La fin de l'article présente une étude statistique inter-individuelle réalisée sur un ensemble de volumes IRM réels.

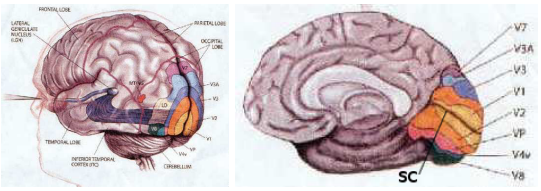

FIG. 1 – Localisation du sillon calcarin (*sc*) (d'après [Hadjikhani, 1998])

2 GÉNÉRATION DES SILLONS CLACARINS

2.1 Segmentation sélective des hémisphères

Cette étape de segmentation (décrite dans [Ciofolo, 2005]) est basée sur l'évolution en concurrence de modèles déformables, ou ensembles de niveau, correspondant à des régions caractéristiques. Nous avons appliqué cette méthode à la segmentation des deux hémisphères et du cervelet, afin d'atteindre la surface inter-hémisphérique de chacun des hémisphères.

Cette évolution des volumes est réalisée par l'application d'une force normale définie par :

$$F = g\left(P_T\right)\left(\rho\kappa - \nu\right), \quad (1)$$

où ν est la direction du contour courant du volume par rapport à la frontière de la structure cible, κ est la courbure du contour, ρ est le poids de la courbure, g une fonction décroissante, et P_T la probabilité de transition entre l'intérieur et l'extérieur de la structure à segmenter. Les termes ν et P_T sont calculés en s'appuyant sur une classification préliminaire des tissus. De plus, la valeur de ν est raffinée à l'aide de règles de logique floue prenant notamment en compte l'existence des autres volumes. On procède alors itérativement en faisant évoluer les volumes en fonction de cette force, l'arrêt du calcul étant déterminé par leur stabilisation. L'utilisation des règles de logique floue assure que les volumes évoluent en réelle concurrence, permettant de mieux maîtriser la détection des formes des interfaces qui les séparent.

Cette segmentation génère des formes très précises qui suivent les sillons principaux au plus près. Dans la suite

*IRISA/ENS Cachan

de notre étude, nous avons besoin de travailler à la fois sur la matière grise et sur le liquide céphalo-rachidien de ses replis. Un remplissage des volumes effectués est donc réalisé afin d'y ajouter les replis manquants, en appliquant une légère dilatation morphologique puis une érosion du volume. Enfin on réalise une soustraction du masque rempli par le masque non rempli de l'autre hémisphère, afin d'éviter un chevauchement des volumes obtenus au niveau inter-hémisphérique.

2.2 Extraction du sillon calcarin

Une fois réalisée la segmentation des hémisphères, il est possible de travailler indépendamment sur chacun des volumes, et donc de traiter avec une plus grande facilité les sillons situés sur le plan inter-hémisphérique. Pour réaliser l'extraction des sillons calcarins, nous avons utilisé la méthode dite du *ruban actif* [Le Goualher, 1999], qui s'appuie sur le calcul de traces externes.

Afin de calculer les traces externes, la région d'intérêt (constituée de la matière grise et du liquide céphalo-rachidien inclus dans ses replis) est dans un premier temps décomposée en sillons et gyri par application en chacun des points d'un opérateur de gémométrie différentielle, l'opérateur $Mlvv$. Cet opérateur correspond au résultat de la moyenne des dérivées directionnelles secondes de la fonction intensité calculées dans la direction du vecteur tangent à chacun des isocontours des directions principales passant par le point P considéré. Une valeur positive de $MLvv$ caractérise ainsi la crête d'un gyrus, et une valeur négative le fond d'un sillon. On ne conserve alors du volume que les parties négatives, qui correspondent aux différents sillons. Une étape de squelettisation est ensuite réalisée pour obtenir la topographie surfacique du cortex, suivie d'une étape d'élagage suivant la profondeur locale du cortex cérébral assurant la conservation des traces les plus pertinentes.

Une sélection manuelle des traces correspondant au sillon calcarin est alors effectuée, et reste l'un des derniers points non automatisables. Une interpolation B-Spline permet de reconstituer les parties éventuellement manquantes. On représente enfin le sillon par sa surface médiane, définie comme la surface partant du fond du sillon vers l'extérieur du cerveau et pseudo-normale à l'enveloppe externe du cerveau. La génération de la surface médiane est effectuée grâce à un modèle actif, initialisé par la trace précédemment calculée. Le modèle actif fait ensuite évoluer cette trace en une forme en deux dimensions, grâce à un ensemble de potentiels qui guident la courbe jusqu'au fond du sillon.

3 ÉTUDE STATISTIQUE

Les sillons calcarins extraits sur les différents sujets, on dispose d'une description de chacun d'eux dans le repère local des images. Par la suite, on souhaite comparer ces différentes informations à l'aide d'une étude statistique. On réalise au préalable une transformation des informations afin de faciliter cette étude. On s'appuie pour cela sur [Corouge, 2003] qui propose une méthode générique d'étude statistique des sillons.

3.1 Repère intrinsèque et rééchantillonnage

On commence donc par calculer pour chaque sillon un repère intrinsèque, équivalent pour chaque exemplaire de la base. Les axes $(\mathbf{u_s}, \mathbf{v_s}, \mathbf{w_s})$ du repère intrinsèque $\mathcal{R}_s(O_s, \mathbf{u_s}, \mathbf{v_s}, \mathbf{w_s})$ sont déterminés de la manière suivante : $\mathbf{u_s}$ suit la longueur du sillon, $\mathbf{v_s}$ la profondeur et $\mathbf{w_s}$ la normale au «plan sulcal». L'ambiguïté des sens est levée du fait que les sillons sont toujours générés dans le même sens, depuis les traces externes jusqu'au fond du sillon. Ce nouveau repère est alors utilisé pour réaliser un recalage rigide, en exprimant les coordonnées de la surface dans le nouveau repère. La variation relative à la taille sera décrite par le modèle de formes. Enfin, on réalise un rééchantillonnage régulier de la surface, afin de comparer par la suite les données entre individus.

3.2 Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) permet de capturer les variations de formes observées parmi un ensemble de structures à étudier. La forme du sillon est décrite par $\mathbf{x}_{i,i=1..N}$, composée d'un ensemble de coordonnées $\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, y_{i,1}, z_{i,1}, ..., x_{i,n}, y_{i,n}, z_{i,n})$. L'objectif de l'ACP est de déterminer une base orthogonale ajustant au mieux ce nuage de points selon un critère géométrique. Pratiquement, cette base est déterminée par les vecteurs propres de la matrice de covariance $\mathbf{C}$:

$$\left\{ \begin{array}{rcl} \bar{\mathbf{x}} & = & \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \mathbf{x}_i \\ \mathbf{C} & = & \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d\mathbf{x}_i {d\mathbf{x}_i}^T \\ & & \text{avec } d\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}} \end{array} \right. \quad (2)$$

Cett nouvelle base est obtenue en diagonalisant la matrice $\mathbf{C} = \Phi\Lambda\Phi^T$, avec $\Lambda = \operatorname{diag}(\lambda_1, ..., \lambda_{3n})$ et $\lambda_1 \leq ... \leq \lambda_{3n}$. Alors la forme $\mathbf{x}$ peut être écrite $\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \Phi\mathbf{b}$ où $\mathbf{b} = (b_1, ..., b_{3n})$ est le vecteur d'observation de la nouvelle base, et $\mathbf{b} = \Phi^T(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})$. Cette décomposition dans la nouvelle base permet de réaliser une approximation modale des observations et de quantifier l'erreur réalisée, en sélectionnant un certain nombre m, $m \leq p$ de modes pour reconstruire l'observation approchée $\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \Phi_m\mathbf{b_m}$, où Φ_m est une sous-matrice $p \times m$ de Φ contenant les m vecteurs propres correspondants, et $\mathbf{b_m} = (b_1, ..., b_m)^T$ représentant une observation quelconque dans le sous-espace m-dimensionnel défini par les m composantes principales retenues.

Si l'on fait l'hypothèse que la distribution des vecteurs $\mathbf{x}_i$ est gaussienne, l'intervalle de variation de chaque $b_{i,i=1..m}$ est : $-3\sqrt{\lambda_i} \leq b_i \leq 3\sqrt{\lambda_i}$, ce qui correspond à $P\left(|b_i| \leq 3\sqrt{\lambda_i}\right) = 99,7\%$.

4 EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS

4.1 Population d'apprentissage et prétraitements

Notre méthode a été testée sur un ensemble de 8 volumes fournis par M. Dojat (Unité INSERM U594). Ils constituent la base d'apprentissage de notre modèle statistique. L'opération de segmentation a été réalisée sur les 8 sujets avec succès (exemple FIG. 2). La génération des traces externes des sillons a ensuite été effectuée sur chacun des sujets, pour les deux hémisphères. Cette extraction

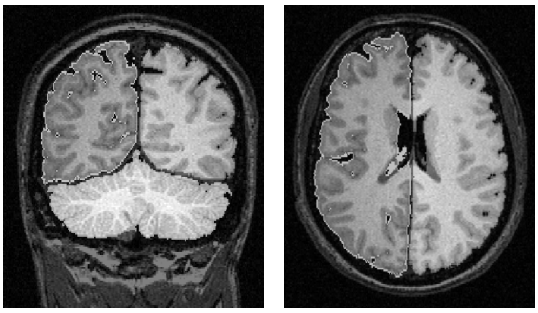

FIG. 2 – Segmentation sélective des hémisphères droit, gauche, et du cervelet. Données IRM M. Dojat

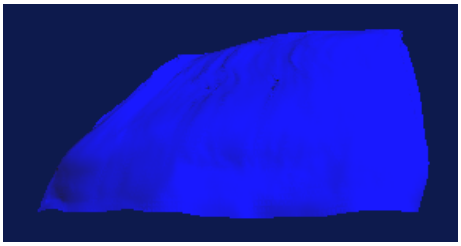

FIG. 3 – Sillon calcarin moyen de l'hémisphère gauche calculé sur l'ensemble d'apprentissage de 8 sujets

n'était pas exploitable au niveau du sillon calcarin pour l'hémisphère droit de deux sujets. On dispose donc de 8 courbes décrivant les sillons calcarins de l'hémisphère gauche de 8 sujets, et 6 courbes représentant les sillons calcarins de l'hémisphère droit de 6 de ces sujets.

4.2 Étude statistique

Le TAB. 1 présente le pourcentage de variance cumulée pour le sillon calcarin de chaque hémisphère selon le nombre de modes retenus. On peut noter que le premier mode est fortement prépondérant. L'étude statistique per-

Modes	Hémisphère gauche	Hémisphère droit
1	75,7	67,0
2	85,8	82,9
3	92,8	92,0
4	95,9	97,2
5	97,8	100
6	99,3	100
7	100	100

TAB. 1 – Pourcentage τ_p de variance cumulée selon le nombre de modes retenus pour les hémisphères gauches et droits ; $\tau_p = \frac{\sum_{i=1}^{m} \lambda_i}{\lambda_T}$

met également de générer le sillon moyen (voir FIG. 2 pour le sillon moyen de l'hémisphère gauche). Ce sillon moyen est le premier pas à la génération d'un altas probabiliste anatomique des aires visuelles. Soulignons que ces résultats, s'ils sont intéressants, sont toutefois à interpréter à la lumière du cardinal de la population d'apprentissage, et dans le cadre expérimental restreint décrit ici, leur portée est limitée.

5 CONCLUSION

Nous avons proposé dans cet article une méthode de modélisation statistique du sillon calcarin. Les spécificités de localisation et de forme de ce sillon ont nécessité la mise en place d'un prétraitement complet permettant l'extraction du sillon proprement dite. Enfin, nous avons illustré cette méthode par une application à un ensemble de 8 sujets. On a pu constater que malgré la complexité du mode opératoire, seuls deux sillons sur 16 n'ont pu être traités. La robustesse de l'extraction des sillons est donc encore améliorable, mais les résultats, s'ils ont été effectués sur un faible ensemble de sujets, semblent tout de même intéressants.
La méthode de description statistique des sillons calcarins que nous avons présentée ici permet d'envisager différentes applications, comme l'établissement d'un atlas statistique des aires visuelles en y apportant les informations relatives aux variations anatomiques inter-individuelles. Enfin, notre méthode permet d'établir une mise en correspondance des différents points de la surface décrivant le sillon calcarin. Ces informations pourraient être utilisées dans le cadre d'un recalage hybride, faisant intervenir à la fois ces informations anatomiques, ainsi que des informations fonctionnelles, comme les frontières des aires visuelles qui se situent de part et d'autre du sillon calcarin.

BIBLIOGRAPHIE

[Ciofolo, 2005] Ciofolo C., Barillot. C. : "Brain Segmentation with Competitive Level Sets and Fuzzy Control", IPMI'2005, Vol.3565, p. 333-344 (2005).

[Corouge, 2003] Corouge I., Hellier P., Gibaud B., Barillot C. : "Interindividual functional mapping : a nonlinear local approach", NeuroImage, Vol.19, N°4, p. 1337-1348 (2003).

[Hadjikhani, 1998] Hadjikhani N., Liu A.K., Dale A.M., Cavanagh P., Tootell R.B.H. : "Retinotopy and color sensitivity in human visual cortical area v8", Nature Neuroscience, Vol. 1, N°3, p. 235241, (1998).

[Le Goualher, 1999] Le Goualher G., Procyk E., Collins D.L., Venugopal R., Barillot C., Evans A.C. : "Automated Extraction and Variability Analysis of Sulcal Neuroanatomy", IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol.18, N°3, p. 206-217 (1999).

[Vaillant, 1996] Vaillant M., Davatzikos C. : "Finding parametric representations of the cortical sucli using an active contour model", Medical Image Analysis, Vol.1, N°4, p. 295-315 (1996).

[Warnking, 2002] Warnking J., Dojat M., Guérin-Dugué A., Delon-Martin C., Olympieff S., Richard N., Chéhikian A., Segebarth C : "fMRI retinotopic mapping - step by step", NeuroImage, Vol.17, N°4, p. 1665-1685 (2005).