

UNIVERSITES PAUL CEZANNE, de PROVENCE, de la MEDITERRANEE  
UNIVERSITE du SUD TOULON-VAR  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE d'ARTS et METIERS

**MASTER SIS**  
*Sciences de l'Information et des Systèmes*

**Mémoire de recherche**

présenté le 23 juin 2005 par  
***Grégory Operto***

**Sujet**

***Paramétrisation de la surface corticale  
à partir d'une parcellisation en gyri***

Stage de recherche effectué au Laboratoire : LSIS

Dans l'équipe : LXAO

Sous la direction de MM. Olivier Coulon et Cédric Clouchoux

# *Paramétrisation de la surface corticale à partir d'une parcellisation en gyri*

<b>Introduction</b>	2
<b>Chapitre I – Etat de l'art</b>	
<b>1. Paramétrisation de la surface corticale : méthodes et enjeux</b>	3
<b>1.1. Le cortex cérébral – Problématique</b>	3
<b>1.2. Rendre le cortex comme une surface facilement paramétrisable</b>	4
<i>a. Mise-à-plat de la surface corticale</i>	4
<i>b. Sphérisation de la surface corticale</i>	5
<b>1.3. Paramétriser une surface et la relier à la surface corticale</b>	6
<b>1.4. Définir la paramétrisation à même la surface corticale</b>	7
<i>a. La théorie des racines sulcales</i>	7
<i>b. Paramétrisation par propagation des coordonnées</i>	8
<b>2. Du concept de gyrius à la paramétrisation d'une surface parcellisée en gyri</b>	9
<b>2.1. Description du cortex en gyri</b>	9
<b>2.2. La parcellisation en gyri selon B. Fischl et al.</b>	10
<b>2.3. La parcellisation en gyri selon A. Cachia et al.</b>	10
<b>2.4. Pistes de recherche pour la paramétrisation des gyri</b>	12
<i>a. Repères anatomiques</i>	13
<i>b. Première stratégie envisagée</i>	13
<b>Conclusion du chapitre premier</b>	14

<b>Chapitre II – Travail de recherche</b>	16
<b>1. Un modèle de description des relations de voisinages entre gyri</b>	16
<b>1.1. Le gyrus en tant que carré unitaire</b>	16
<b>1.2. Equivalence entre intersections</b>	18
<b>1.3. Extension du modèle à son maximum</b>	18
<b>1.4. Du diagnostic de l'intersection à la définition des quatre arêtes</b>	19
<b>2. La diffusion des coordonnées</b>	20
<b>2.1. Modèle de propagation de la chaleur</b>	20
<i>a. Equation de Fourier</i>	20
<i>b. Résolution de l'équation en 1D</i>	21
<b>2.2. Descriptif pratique de la méthode</b>	22
<b>2.3. Influence des paramètres de la diffusion</b>	22
<i>a. Importance de l'initialisation</i>	22
<i>b. Influence du pas temporel</i>	23
<i>c. Influence du critère d'arrêt</i>	23
<b>3. Contraintes additionnelles</b>	24
<b>3.1. Contraintes ponctuelles</b>	24
<b>3.2. Contraintes iso-extraites</b>	25
<b>3.3. Contraintes mixtes</b>	26
<b>4. Validation, mises en application et perspectives</b>	27
<b>4.1. Paramétrisations en images</b>	27
<b>4.2. Mises à plat de gyri</b>	29
<b>4.3. Validation à base de données fonctionnelles</b>	29
<i>a. Projection de cartes somatotopiques dans le repère surfacique</i>	29
<i>b. Etude comparative des deux techniques de contraintes</i>	31
<i>c. Définition de contraintes au niveau de foyers fonctionnels</i>	32
<b>4.4. Perspectives</b>	33
<b>Conclusion</b>	35
<b>Annexe A – Inventaire des schémas d'intersections reconnus</b>	36
<b>Annexe B – Modèle de description de la parcellisation en gyri</b>	39
<b>Bibliographie</b>	40

## Introduction

L'imagerie cérébrale a compté pour beaucoup dans l'essor qu'ont connu les neurosciences au cours de ces dernières décennies. Dans l'optique de pallier aux faiblesses intrinsèques des techniques d'observation, les outils de traitement automatique des images se sont eux-mêmes perfectionnés en parallèle et c'est ainsi que sont apparues des collections de méthodes de segmentation, de recalage, inter ou intra-individus, voire inter-modalités. Chaque technique présente des atouts comme des inconvénients ; l'imagerie par résonance magnétique (IRM) est pourtant régulièrement vantée pour sa nature *a priori* atraumatique et, depuis qu'elle est capable de renseigner sur l'activité même du cerveau (on parle d'IRM fonctionnelle), elle est utilisée sur de nombreux fronts (morphométrie, psychologie cognitive, psychopathologie, ...).

A l'heure actuelle, la plupart des outils élaborés exploitent un modèle cérébral volumique (pour ainsi dire tridimensionnel), un modèle qui découle du format sous lequel les données sont initialement acquises. En effet, les volumes cérébraux IRM étant acquis en coupes, c'est sous cette forme que les outils d'analyse d'images ont d'abord cherché à les traiter. Des atlas et des systèmes de coordonnées ont également été mis au point, comme le repère de Talairach [1] dans lequel un triplet de coordonnées décrit chaque point du cerveau, ce dernier étant préalablement normalisé par des transformations affines. On s'aperçoit néanmoins que l'analyse volumique ne convient pas forcément à l'étude de certaines structures, comme le cortex. Car au vu de son architecture caractéristique superficielle, un paradigme différent suscite l'intérêt des recherches qui lui sont liées : l'approche surfacique.

Si on peut s'attendre de cette façon à de plus pertinentes descriptions de la structure corticale, l'inférence de théorèmes généraux, par exemple à l'échelle de l'espèce, reste néanmoins sensiblement freinée par la variabilité qui la caractérise. Des corrélations inter-individus fiables, en ce qui concerne le cortex, ne devraient donc exploiter que des procédés permettant une localisation précise sur la surface corticale, respectant au mieux sa topologie et sa géométrie. C'est notamment dans cette optique que l'idée de donner au cortex une paramétrisation intrinsèquement surfacique est née.

Mais cette paramétrisation pourrait également très bien avoir deux niveaux de description : le premier considérerait un modèle de description du cortex en régions appelées gyri. Un gyrus possède une prétendue intégrité structuro-fonctionnelle qui n'est pas encore totalement éclaircie mais qui a l'avantage d'être observable chez tout sujet d'une manière plus ou moins stable : la plupart des atlas neuroanatomiques s'accordent d'ailleurs sur une nomenclature de ces gyri. En considérant l'hypothèse de stabilité inter-sujets de ces gyri, une bonne paramétrisation de la surface corticale tiendrait ainsi compte de cette parcellisation. L'idée est donc à présent de paramétriser chaque gyrus : le problème est translaté vers une échelle plus locale.

Une étude bibliographique a ainsi pour objet de présenter le sujet de recherche au travers d'une synthèse critique des travaux précédemment effectués sur le problème posé, avant d'exposer les orientations envisagées pour traiter le sujet. Ainsi, seront d'abord détaillées les techniques qui ont visé, ou qui visent, à paramétriser la surface corticale dans son ensemble. Puis seront introduits les travaux menés autour du concept de parcellisation en gyri, avant d'esquisser les pistes de travail envisagées avant le début du projet de recherche. Une deuxième partie décrit alors le travail développé et la contribution apportée au problème posé. C'est à travers cette grille de lecture que le lecteur est invité à parcourir ce mémoire de stage.

## Chapitre 1

### Etat de l'art

#### 1. Paramétrisation de la surface corticale : méthodes et enjeux

##### 1.1. Le cortex cérébral - Problématique

L'observation en coupes du cerveau suggère immédiatement l'existence de deux qualités principales de tissus, reconnaissables à leurs couleurs caractéristiques et à leurs positions relatives : on distingue très généralement, au centre de la coupe, une zone dont le périmètre aux abondants replis fait frontière avec une bande périphérique, de largeur quasi-constante, sensiblement plus foncée (figure 1). Ce constat donne déjà une idée valable de la structure corticale : en effet, le cortex cérébral recouvre les deux hémisphères du cerveau à la manière d'un manteau, constitué de plusieurs couches de neurones, présentant chez les mammifères les plus évolués de multiples plissements [2].

Le cortex dispose de nombreux modèles de description : au delà de la subdivision en lobes qui le découpe au niveau de certains sillons principaux, certaines cartes se fondent sur des critères purement anatomiques, voire microanatomiques [3] (on parle de cytoarchitecture), ou bien même fonctionnels (figure 1). La mesure de l'activité cérébrale étant généralement liée au métabolisme énergétique des cellules nerveuses [4], la haute densité en corps cellulaires qui caractérise le cortex cérébral (et qui lui confère son aspect brun grisâtre) en fait précisément une région d'intérêt majeur pour l'analyse fonctionnelle. Ce qui explique en partie les correspondances tacites observables entre les surfaces sensorielles (rétine, cochlée, peau, ...) et certaines zones de la surface corticale : on parle à ce sujet de rétinotopie, de tonotopie, de somatotopie, ... De manière globale, ces modèles de description s'accordent tous sur une description surfacique du cortex cérébral, et suggèrent différents efforts de recherche d'une paramétrisation de la surface corticale, à différents échelles : des efforts qui, d'une manière générale, se sont entre autres heurtés à deux obstacles majeurs en matière de neurosciences, à savoir la relative complexité des processus cognitifs, ainsi que l'extrême variabilité anatomo-fonctionnelle du cortex, d'un individu à l'autre.

De nombreux enjeux reposent ainsi sur la qualité de cette paramétrisation : premièrement, la capacité à localiser un point sur la surface corticale à l'aide d'un modèle générique le plus précis qui puisse être, de sorte à dépasser les caractères intrinsèques à l'individu ; ensuite, une détection de l'activité fonctionnelle qui serait directement liée à la surface corticale serait logiquement plus pertinente ; enfin, les corrélations inter-individus – à diverses fins de morphométrie ou d'analyse fonctionnelle par exemple – qui exploiteraient cette

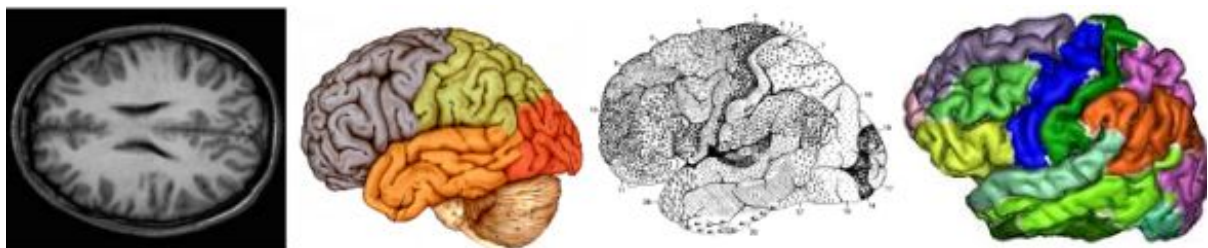


Figure 1 : de gauche à droite : mise en évidence de l'interface cortex / matière blanche – différents modèles de description de la surface corticale : subdivision du cortex en quatre lobes ; cartographie cytoarchitectonique de Brodmann [3] ; parcellisation en gyri [14]

paramétrisation seraient immédiatement plus fiables. Tous ces exemples s'inscrivent bien entendu dans la démarche de la meilleure compréhension du cerveau et de ses mécanismes.

Rien que du point de vue géométrique, la variabilité ainsi que les nombreux plis de la surface corticale la rendent difficilement paramétrisable : il faut donc passer par des chemins plus ou moins déviés. Plusieurs méthodes ont traité le problème sur des maillages en 3 dimensions reconstruisant l'interface entre cortex et matière blanche. Ces méthodes sont loin d'être nombreuses mais l'évolution, au travers de celles-ci, des objectifs, des hypothèses, liés à la résolution du problème, est tout à fait intéressante dans notre optique.

## **1.2. Rendre le cortex comme une surface facilement paramétrisable**

Une approche intuitive du problème dans sa résolution consiste à dire que pour paramétriser une surface quelconque, on peut très bien la déformer en une surface dont la paramétrisation est évidente (telle qu'un plan, une ellipse, une sphère, ...). Dans ce cadre précis, B. Fischl et al. [5] a introduit une méthode qui, selon les modalités de son application, peut soit « gonfler » le maillage cortical, soit le mettre à plat, soit le rendre sphérique. Le gonflement du maillage n'a d'intérêt en soi que pour la visualisation, puisqu'il permet l'observation des 60 à 70 % de la surface corticale enfouie au sein de ses sillons [6]. Le principe de la méthode consiste à modéliser l'action de deux forces agissant sur les points du maillage au travers d'une fonction d'énergie caractérisant l'aspect « replié » du maillage (plus le maillage est replié, plus son « énergie » est grande). L'une des ces forces tend à déplier le maillage alors que l'autre vise à minimiser les distortions métriques induites par le gonflement. La minimisation de la fonction d'énergie résulte alors en un maillage d'apparence « gonflée » (figure 3).

### *a. Mise-à-plat de la surface corticale*

B. Fischl et al. [5] propose d'appliquer sa méthode en alternant des étapes de projection et de minimisation de la fonction d'énergie afin de donner une forme désirée à la surface corticale. Dans le cas de la mise-à-plat, les projections se font sur un plan (sans pour autant qu'il soit précisé en quoi la projection affecte le « potentiel » du maillage décrit par la fonction d'énergie). Après avoir incisé la surface, en certains endroits choisis, pour la rendre de topologie plane, les points sont ainsi itérativement projetés et réorganisés jusqu'à donner une image plane du maillage d'origine avec un minimum de distortions métriques. La méthode est encore une fois d'un intérêt majeur en matière de visualisation puisqu'il permet l'observation simultanée de tout un hémisphère. De plus, en partant du principe que la paramétrisation d'une surface mise-à-plat devient évidente au travers d'un classique repère cartésien (figure 2), les cartes planes sont alors défendues comme étant le moyen d'effectuer de pertinentes corrélations inter-individus [7,8]. Mais l'absence de considérations anatomiques rigoureuses empêche la paramétrisation de dépasser formellement l'échelle de l'individu. Car les corrélations qui sont faites le sont généralement à l'échelle du lobe : après la mise-à-plat d'un lobe chez deux individus distincts, un recalage non-rigide est opéré par rapport aux bords des surfaces planes [8]. Le concept d'une bonne paramétrisation, qui donnerait lieu à de pertinentes corrélations, tiendrait en l'occurrence compte des structures anatomiques repérables au sein même de ce lobe.

Cela n'empêche toutefois pas le dépliage de la surface corticale d'être en soi une façon de traiter le problème de la localisation sur le cortex. Hélas, le cadre de visualisation dans lequel le protocole rentre impose des contraintes (ciblage de la géométrie plane, minimisation des distortions métriques) en déphasage avec celles suggérées par notre approche du problème.

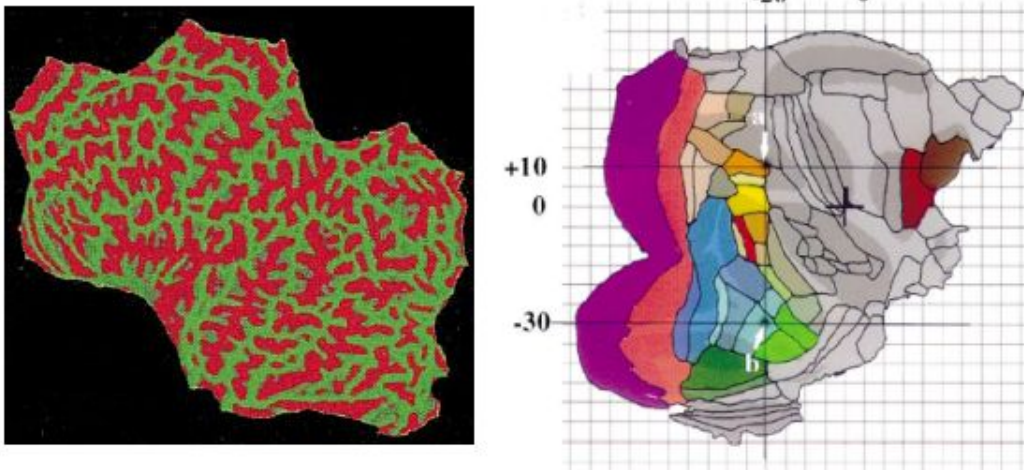


Figure 2 : à gauche – un hémisphère de la surface corticale mis-à-plat par B. Fischl (extrait de [5]) ; à droite – un lobe mis-à-plat et paramétrisé par Van Essen (extrait de [7])

### *b. Sphérisation de la surface corticale*

Au lieu de projeter sur un plan comme pour la mise-à-plat, B. Fischl et al. [5] propose aussi d'intercaler une projection sphérique des points du maillage entre deux itérations successives de la « minimisation d'énergie » du maillage. Dans ce cas et contrairement au précédent, la topologie sphérique du cortex est conservée puisque les incisions ne sont pas introduites. Une fois le maillage rendu sphérique, on souhaiterait à nouveau pouvoir corrélérer les maillages d'individus distincts : c'est pourquoi la surface sphérique est décrite par un système de coordonnées en latitudes et longitudes (figure 3). Le recalage des « sphères » entre elles se fait alors en maximisant la corrélation des mesures de convexités entre les deux maillages originaux. L'absence de détails supplémentaires à ce sujet suggère que le recalage est vraisemblablement fait de manière rigide. Cette manière d'agir permet ainsi indirectement le recalage des sillons les plus importants, mais ne montre pas de considérations anatomiques poussées. En comparaison des contraintes adoptées par les plus récentes méthodes, la signification de cette paramétrisation devient relative.

Le principe des concepts proposés par B. Fischl et al. [5] relève de cette façon, aussi bien par la mise-à-plat que par la sphérisation, d'une combinaison entre paramétrisation (affectation des coordonnées) et recalage (alignement des coordonnées entre individus). Il est maintenant tout-à-fait intéressant d'analyser l'évolution de cet équilibre au travers des méthodes suivantes, qui constituera éventuellement un élément de justification de notre optique de recherche.



Figure 3 : à gauche – maillage cortical « gonflé » ; à droite – maillage rendu sphérique : les méridiens et parallèles traduisent le système de coordonnées imposé (extraits de [5])



### 1.3. Paramétriser une surface et la relier à la surface corticale

L'approche proposée par R. Toro et Y. Burnod [10] se démarque sensiblement de la précédente tout d'abord par ses considérations anatomiques plus précises : l'hypothèse est prise en compte selon laquelle une localisation pertinente sur le cortex doit se faire en relation avec des marqueurs structurels, tels que des sillons. Le cortex y est décrit comme une surface organisée en couches, mais aussi en colonnes, et si la paramétrisation proposée se base principalement sur un ensemble de marqueurs anatomiques, de sillons dits « primaires » pour leur nature plus ou moins invariante au travers de l'espèce, les réflexions apportées sur les aspects fonctionnels, embryologiques ou taxonomiques, mettent bien en évidence une façon différente de poser le problème, mieux en phase avec la question de la variabilité corticale.

La méthode proposée dans ce cas pour distribuer les coordonnées surfaciques sur le cortex peut globalement se résumer en trois étapes :

- premièrement, un *modèle géométrique* est défini sous la forme d'une sphère sur laquelle on appose des axes traduisant des sillons primaires (figure 4).
- ensuite, la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles permet la définition d'une bijection associant chaque point du *modèle géométrique* à un point de la surface corticale, les axes du modèle constituant les conditions aux limites du système. Le recalage entre les axes du *modèle géométrique* et leurs structures anatomiques correspondantes sur la surface corticale est ensuite effectué de manière manuelle.
- enfin, les points de la surface corticale sont affectés de coordonnées angulaires et l'affectation se fait en relation avec les orientations principales des circonvolutions corticales. Les axes disposant d'invariantes positions de référence, il est toujours possible de calculer la distance d'un point par rapport aux sillons principaux (figure 4).

Les sillons principaux sont régulièrement pris en référence dans la mesure où ils sont caractérisés par une relative invariance d'un individu à l'autre. Cette stabilité n'a toutefois rien de formel puisqu'on observe que, par exemple, même le sillon central (pourtant considéré comme primaire pour sa profondeur, de sa précocité de développement et de son faible degré de variabilité) apparaît divisé en deux chez certains sujets. De cette façon, il arrive que certains sillons « tertiaires » ne trouvent pas leurs homologues d'un cortex à un autre. Il serait donc *a priori* hasardeux de vouloir se baser sur de tels marqueurs pour se localiser sur la surface.

La méthode offre ainsi une nouvelle approche de la paramétrisation corticale sur critères géométriques, plus rigoureuse que la précédente sur le plan de l'anatomie. Il est certes

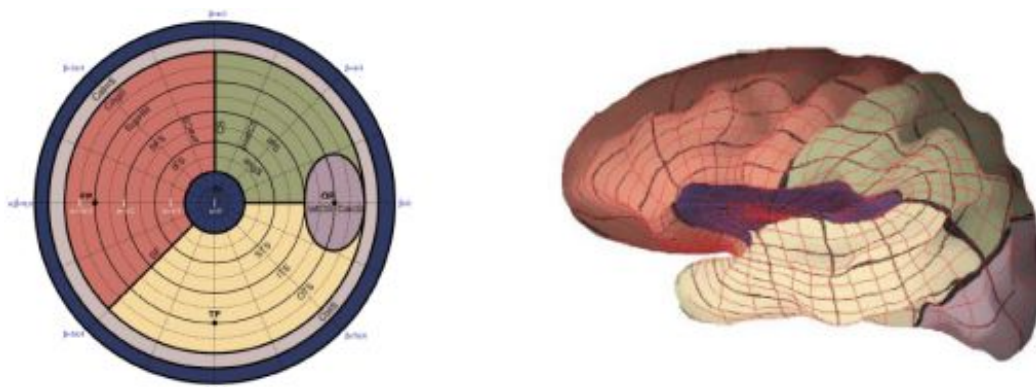


Figure 4 : à gauche – le modèle géométrique en représentation stéréographique ; à droite – représentation de l'association bijective points du modèle / points de la surface corticale ainsi que du système contraint de coordonnées (extraits de [10])



regrettable que la définition des axes du modèle géométrique n'exploite pas la part d'« invariabilité » qui pourrait résider dans les sillons secondaires ou tertiaires, toutefois cela met clairement en évidence qu'une grande part du problème général réside dans la distinction de ce qui est intrinsèque à l'individu ou à l'espèce (ou à une autre échelle de la classification systématique).

D'une manière globale, on peut observer une nouvelle fois un hybridisme de la méthode entre paramétrisation et recalage, comme on a pu le constater au travers des travaux de B. Fischl et al. [5]. En effet, la définition du *modèle géométrique* ainsi que la distribution des coordonnées s'apparente rigoureusement à un travail de paramétrisation, pourtant son adaptation à la surface corticale de l'individu est davantage un problème de recalage. Les travaux de C. Clouchoux et al. [11] offrent justement une approche supplémentaire de ce problème, détaillée ci-après.

#### 1.4. Définir la paramétrisation à même la surface corticale

Les précédentes méthodes ont toutes deux montré une paramétrisation de la surface corticale passant par l'intermédiaire d'une surface « générique », que cela soit la sphère en laquelle B. Fischl et al. [5] déforme ses maillages corticaux, ou bien le *modèle géométrique* que définissent R. Toro et Y. Burnod [10] pour repérer les leurs. La méthode qui suit [11] se distingue des précédentes en ce qu'elle définit la paramétrisation à même le maillage et ne procède à aucun recalage au sens large : la définition des contraintes anatomiques ainsi que la distribution des coordonnées se fait directement sur les points de la reconstruction 3-D du cortex. Ces contraintes exploitent notamment la théorie des *racines sulcales* [12].

##### a. La théorie des racines sulcales

J. Régis a formalisé des observations de sillons, aussi bien en surface qu'en profondeur, et à tous les stades du développement du cerveau, et a élaboré la théorie des racines sulcales qui postule l'existence dans le cortex adulte de structures stables (en position, nombre et orientations), enfouies dans le fond du cortex [12,13]. Ces structures comparables à des atomes du motif sulcal seraient identifiables chez tout sujet (figure 5). Soumises à différents phénomènes mécaniques (dont la nature n'est pas encore parfaitement éclaircie) au cours du développement cérébral, leur réorganisation est caractéristique à chaque individu et est en partie responsable de la variabilité du motif sulco-gyral, et donc indirectement de la surface corticale. Le terme de «*racine*» fait donc ici référence à la fois à la précocité de leur apparition au cours du développement cérébral et à leur position profonde [13].

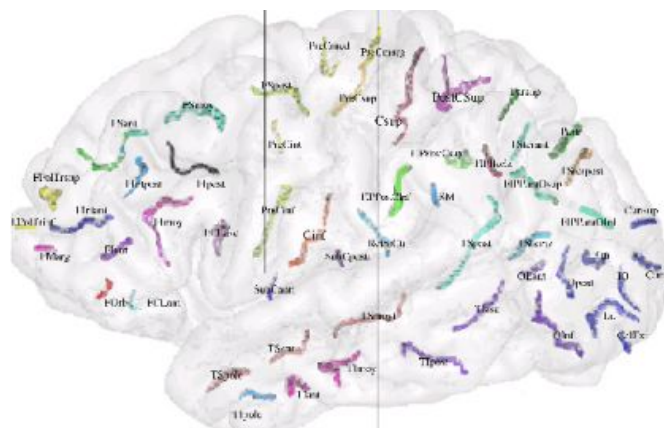


Figure 5 : représentation des racines sulcales dans l'hémisphère droit (extrait de [12])

L'intérêt de cette théorie dans le cadre de notre problème est précisément qu'elle offre un cadre de structures invariantes sur lesquelles une paramétrisation pourrait *a priori* se baser.

*b. Paramétrisation par propagation des coordonnées*

C. Clouchoux et al. [11] travaille actuellement sur un modèle de paramétrisation anatomiquement invariante d'un individu à l'autre qui tâche de se baser sur les racines sulcales identifiables au sein du maillage cortical. L'idée principale est de repérer chaque point du maillage à l'aide d'une latitude et d'une longitude, en contraignant les coordonnées des points appartenant à ces bouts de sillons, le tout étant rigoureusement automatique. On constate une fois de plus le caractère intuitif des coordonnées sphériques, qui traduisent bien la topologie du cortex. Une fois les deux pôles choisis, on définit des coordonnées arbitraires qu'on affecte aux points correspondant aux sillons (plus précisément aux *racines sulcales*). Puis, on applique une technique issue des travaux de C. Brechbuhler [14] : celui-ci propose un moyen de décrire toute forme tridimensionnelle fermée par un système de coordonnées surfaciques (figure 6). Le principe consiste à propager à partir des deux pôles (nommés en l'occurrence pôles chaud et froid) les coordonnées à la surface du maillage à la façon de la chaleur dans un matériau isotropiquement conducteur. Les sillons entre les deux pôles jouant le rôle de sources de chaleur supplémentaires (à des températures intermédiaires), la distribution des coordonnées a l'avantage d'être continue et monotone (figure 6). La forme exceptionnelle de certains sillons tend parfois cependant à compromettre par cette méthode la nature bijective de l'association entre couples de coordonnées et points du maillage, condition absolument nécessaire de la paramétrisation. Le problème est à ce jour en train d'être traité.

A ce stade, la question que l'on peut se poser est : les sillons offrent-ils une information suffisante pour garantir la pertinence et donc l'invariance de la paramétrisation ? Il est difficile de répondre actuellement à cette question tant que l'architecture « atomique » générale du cerveau n'aura pas été davantage élucidée. L'optimisation du modèle paramétrique passera en toute vraisemblance par l'introduction de critères fonctionnels.

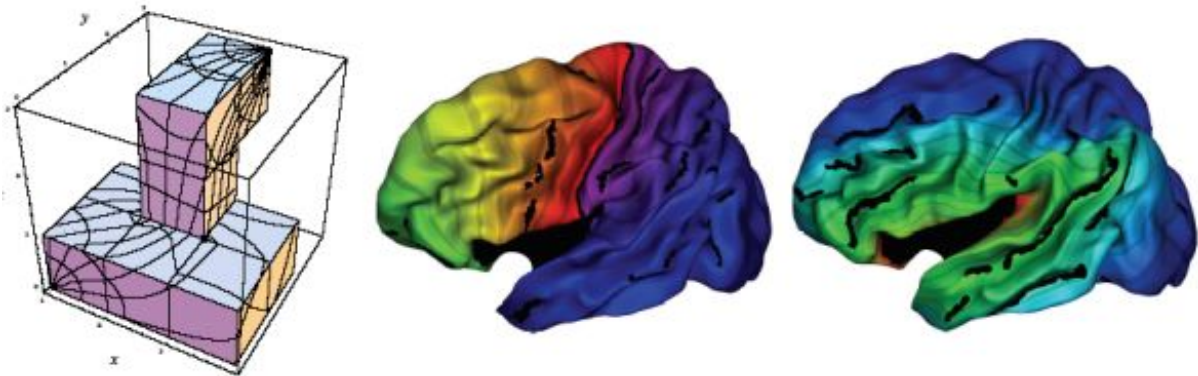


Figure 6 : à gauche – propagation par C. Brechbuhler (extrait de [14]) ; à droite – propagation sur des maillages corticaux des longitudes (centre), et des latitudes (droite) (extrait de [11])

A ce stade, il est possible de constater que paramétrisation et recalage sont deux manières de traiter un même problème. Dans l'approche volumique, l'histoire a fait que le recalage a été favorisé, notamment du fait qu'on dispose dès l'acquisition d'un repère intrinsèque 3D (la grille de voxels). Notre problématique invite à envisager un travail de paramétrisation surfacique à deux niveaux de description, intégrant la notion de gyri. Plusieurs travaux ont approfondi ce concept en proposant des méthodes de parcellisation automatique de la surface corticale. L'étude de ces travaux est intéressante dans notre optique, et en particulier l'étude des amers utilisés pour la définition des gyri, que notre paramétrisation des gyri pourrait éventuellement exploiter.

## 2. Du concept de gyrus à la paramétrisation d'une surface parcellisée en gyri

On a vu précédemment que la paramétrisation de l'ensemble de la surface corticale constituait un problème complexe sur lequel reposent indirectement beaucoup de thèmes de recherche en neurosciences. Une idée fondatrice de notre projet de recherche est attachée au concept de parcellisation du cortex en gyri. En effet, s'il était possible de partitionner la surface corticale d'une façon pertinemment reliée à ses propriétés anatomo-fonctionnelles, et donc d'une manière reproductible d'un individu à l'autre, on pourrait alors envisager de translater le problème de la paramétrisation à une échelle plus locale : en cela, la parcellisation du cortex en gyri est précisément une option intéressante.

### 2.1. Description du cortex en gyri

La définition d'un gyrus est très généralement rapprochée de celle d'une circonvolution corticale. En effet, gyri et sillons sont deux structures duales et recouvrent l'entière surface du cortex. Toute une collection de méthodes visent à ce propos à segmenter les sillons corticaux dont on a vu qu'ils pouvaient être utiles pour se repérer. Pourtant, le sillon peut difficilement être considéré comme une structure de base du cortex, contrairement au gyrus. Mais les gyri sont caractérisés par une telle variabilité morphologique que les méthodes leur étant dédiées sont très peu nombreuses [13].

Le gyrus est foncièrement intéressant du fait de la prétendue intégrité anatomo-fonctionnelle qu'il présente, et pour cette raison joue un rôle de plus en plus important en imagerie fonctionnelle. Effectivement, pour toute une collection d'exercices cognitifs, l'activité fonctionnelle reste souvent localisée à un gyrus voire à un sillon, et pas seulement à une aire de Brodmann [10]. Les mécanismes liés à la gyrogénèse sont encore plus ou moins obscurs, c'est notamment pourquoi les auteurs de méthodes automatiques de parcellisation ne s'accordent pas sur les mêmes critères de définition des gyri. Une nomenclature particulière des gyri revient néanmoins généralement d'un atlas neuroanatomique à un autre (figure 7).

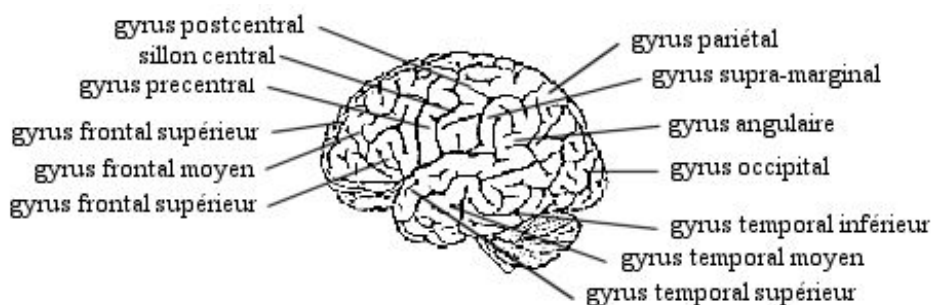


Figure 7 : gyri les plus couramment représentés dans la littérature

Cette parcellisation standard peut bien sûr être remise en question en même temps que les critères de définition des gyri, d'autant qu'elle fut proposée par les neuroanatomistes à une époque où la ségrégation du cerveau en aires fonctionnelles n'était pas connue [13]. Ainsi, le point de vue standard n'est pas forcément le seul qui ait du sens pour comparer des populations. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier la démarche proposée par chacune des méthodes de parcellisation et d'ainsi inspirer notre optique de recherche.

## 2.2. La parcellisation en gyri selon B. Fischl et al. [15]

La méthode de parcellisation proposée par B. Fischl et al. [15] est introduite au travers d'une hypothèse pertinente, stipulant que la parcellisation de la surface corticale peut légitimement reposer sur des propriétés autres que la géométrie corticale. Il fait ainsi allusion aux relations structures-fonctions identifiables ou à la cytoarchitecture, globalement à des données indisponibles par l'analyse d'une image IRM. L'illustration est donnée en soulignant que certains sillons changent de nom en passant d'un lobe à un autre. Selon lui, l'hétérogénéité fonctionnelle devrait pouvoir amener à étiqueter de manière différente deux régions adjacentes même s'il est impossible de les distinguer à l'échelle macroscopique.

Une autre idée forte de cette méthode est l'exploitation de champs de Markov pour procéder à la parcellisation. De cette façon, la définition d'un gyrus se fait en termes de probabilités. A partir d'exemples manuellement parcellisés, la technique construit des postulats autour de la localisation des gyri et de leurs positions relatives, c'est-à-dire leurs contextes respectifs, comme par exemple : « le gyrus précentral longe fréquemment le sillon central ». La parcellisation résulte alors de la satisfaction optimale des lois élaborées : un gyrus « bien défini » est un gyrus dont la position respecte sa probabilité de présence en ce lieu et dont le voisinage effectif corrobore bien la probabilité théorique évaluée pour ce voisinage.

La technique donne des parcellisations comparables aux parcellisations manuelles, tout en laissant logiquement apparaître de singulières différences (figure 8).

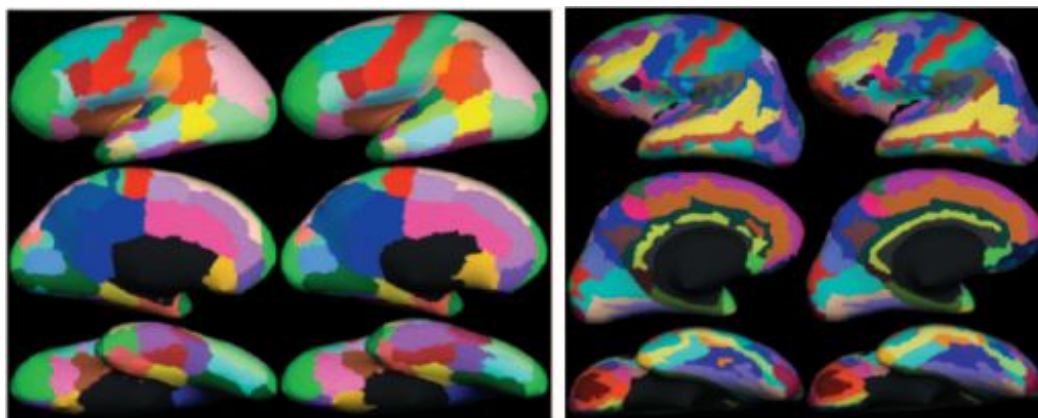


Figure 8 : *parcellisations de la surface corticale en gyri par méthode manuelle (à gauche) et automatique (à droite). Les maillages « gonflés » sont présentés en vue latérale, médiale et ventrale. (extrait de [15])*

## 2.3. La parcellisation en gyri selon A. Cachia et al. [13,16]

Le gyrus a pour habitude d'être généralement défini comme une zone délimitée par deux sillons parallèles. Cette idée a précisément inspiré le début des travaux de A. Cachia et al. [13,16] autour d'une méthode automatique de parcellisation de la surface corticale en gyri (figure 10). L'idée convient bien à certains gyri tels que les gyri pré- ou post-central mais il est abusif de la généraliser à tous : en effet, en vertu de la nature plus ou moins arbitraire de la parcellisation standard adoptée par les neuroanatomistes, certains gyri tels que les gyri orbitaux ne répondent pas rigoureusement à cette règle morphologique.



La méthode repose ainsi sur une détection préalable des sillons et peut globalement se décrire en trois étapes :

- segmentation des sillons à partir des images brutes
- projection des lignes de fond de sillons sur le maillage cortical
- définition des gyri à partir des sillons sur la surface cortical

La définition se fait concrètement à l'aide de diagrammes de Voronoï calculés « géodésiquement » au maillage cortical. Ces diagrammes permettent de partitionner un espace en « zones d'influence » : la zone d'influence d'un point d'un ensemble contient tous les points de l'espace plus proches de ce point que de n'importe quel autre point de l'ensemble. Un premier diagramme est défini à partir des sillons-mêmes (figure 9b). L'intersection de leurs zones d'influence procure les *graines gyrales*. De ces graines gyrales (figure 9c), on obtient un second diagramme de Voronoï : le gyrus est considéré comme la zone d'influence d'une graine gyrale (figure 9d), à savoir la zone contenant les points plus proches de cette graine que de n'importe quelle autre [16]. On peut présager que les sillons de départ constitueront en partie la frontière du gyrus ; il existe en revanche des zones sans aucun sillon où la compétition entre les zones d'influence définira les frontières des différents gyri.

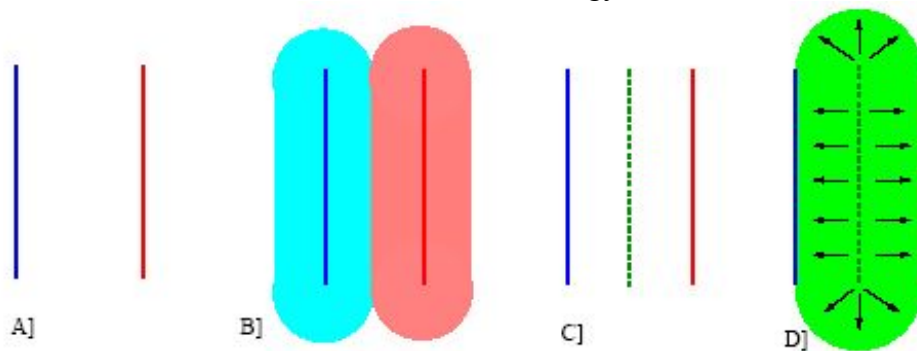


Figure 9 : *principe général de la définition d'un gyrus à partir de deux sillons parallèles par le biais de diagrammes de Voronoï (extrait de [13])*

On aurait tendance à penser que la méthode est purement géométrique en la resumant à de la propagation de zones à partir de sillons. Mais c'est sans considérer le travail de la segmentation des sillons qui, faisant notamment appel à des réseaux de neurones [17], ne se limite pas à l'exploitation d'informations géométriques. Il faut également savoir qu'à l'heure actuelle, les règles de définition des gyri adoptées par cette méthode ont légèrement évolué, puisqu'il est entre autres possible de définir des gyri à l'aide de davantage de sillons. Le modèle est ainsi capable de mieux décrire certaines formes exceptionnelles de gyri.

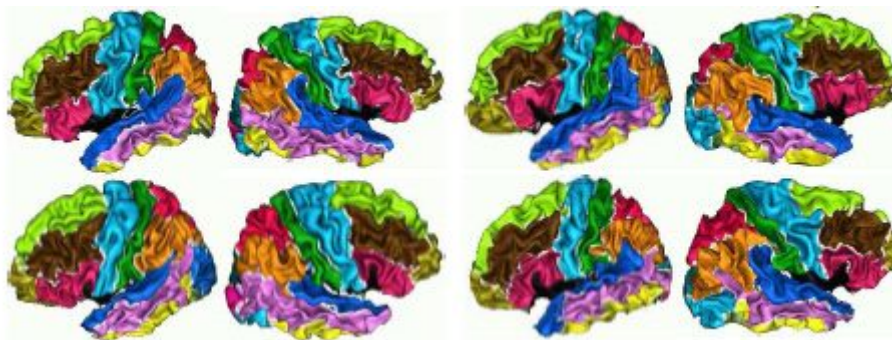


Figure 10 : *parcellisations en gyri par la méthode de A.Cachia et al. (extrait de [13])*

## 2.4. Pistes de recherche pour la paramétrisation des gyri

Au cours de notre travail, nous utiliserons la plate-forme logicielle BrainVISA / Anatomist (<http://brainvisa.info/>), développée par l'équipe du Service Hospitalier Frédéric Joliot d'Orsay, pour les opérations de visualisation. Il faut également savoir que notre projet prendra place à la suite du travail de parcellisation automatique de A. Cachia et al. [13], c'est pourquoi nous nous sommes davantage attachés à cette dernière méthode plutôt qu'à d'autres ; mais absolument rien n'empêche notre recherche de s'inspirer d'autres travaux, bien au contraire.

Notre travail de préparation a entre autres consisté en l'observation de maillages corticaux parcellisés en gyri, afin d'appréhender les différentes formes générales observables de gyri et de nous confronter une première fois au problème de la variabilité (figures 11a et 11b).

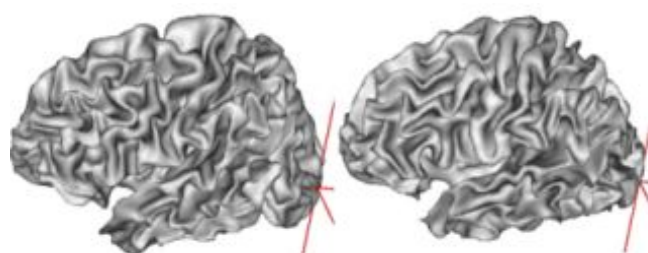


Figure 11a : deux maillages de l'interface cortex – matière blanche observés à l'aide de l'outil de visualisation Anatomist : mise en évidence de la variabilité corticale

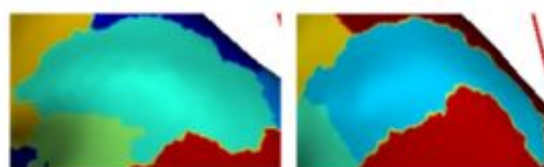


Figure 11b : le même gyrus observé sur deux maillages gonflés différents : mise en évidence de la variabilité gyrale

Nous disposerons notamment de différentes textures issues du déroulement de la parcellisation, à savoir par exemple : la projection des fonds de sillons sur le maillage, le premier diagramme de Voronoï, une représentation des *graines gyrales* sur le maillage, et bien sûr la parcellisation en gyri (figure 12). La visualisation et l'analyse de maillages est une étape fondamentale de notre travail ; de plus, l'application des textures sur des maillages « gonflés » est un excellent moyen d'observer la morphologie générale des gyri « sans » l'inconvénient des plis corticaux.

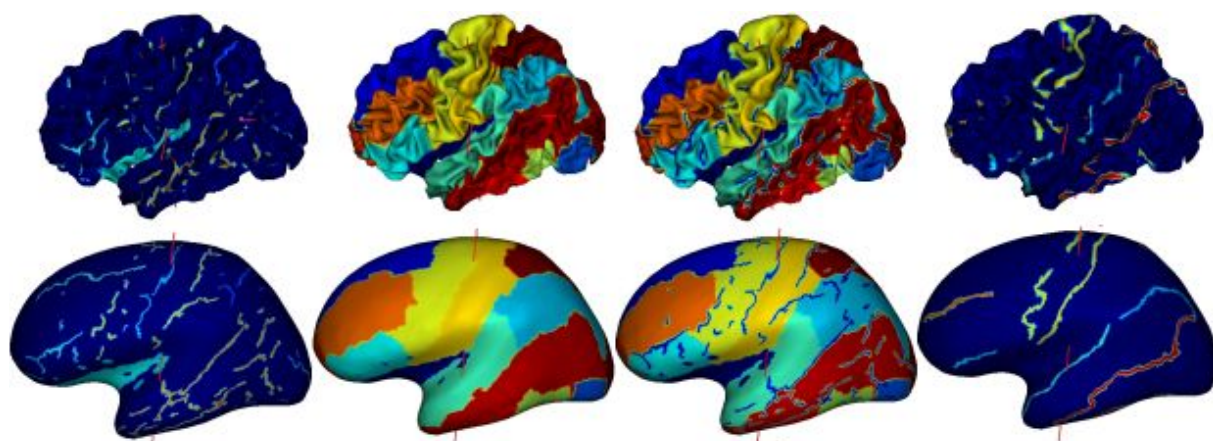


Figure 12 : de gauche à droite : projection des sillons sur le maillage – parcellisation en gyri – parcellisation en gyri avec projection des sillons – représentation des graines gyrales. (en haut : maillages originaux – en bas : maillages gonflés)

A ce stade, l'étude des travaux en relation avec notre problème et l'analyse des obstacles auxquels ils ont pu se confronter a permis l'élaboration d'éventuelles stratégies que nous tâcherons de mettre en pratique et dont nous évaluerons la pertinence au cours de nos recherches.

#### *a. Repères anatomiques*

Il semble d'abord relativement intuitif que notre paramétrisation des gyri se base sur leurs bords, encore que cela ne soit pas indispensable. Les concepts évoqués par B. Fischl et al. [15] dans sa méthode automatique de parcellisation peuvent justement nous inspirer pour le repérage sur ces bords. En effet, en considérant la stabilité des positions relatives des gyri (au moins dans certains cas), les points d'intersection entre gyri pourraient légitimement servir d'amers le long des bords.

Aussi, il serait dommage de ne pas savoir profiter de la forme générale qui caractérise certains gyri (notamment les gyri autour du sillon central, très souvent de forme allongée). La paramétrisation gagnerait certainement à s'appuyer sur cette forme particulière (figure 13).

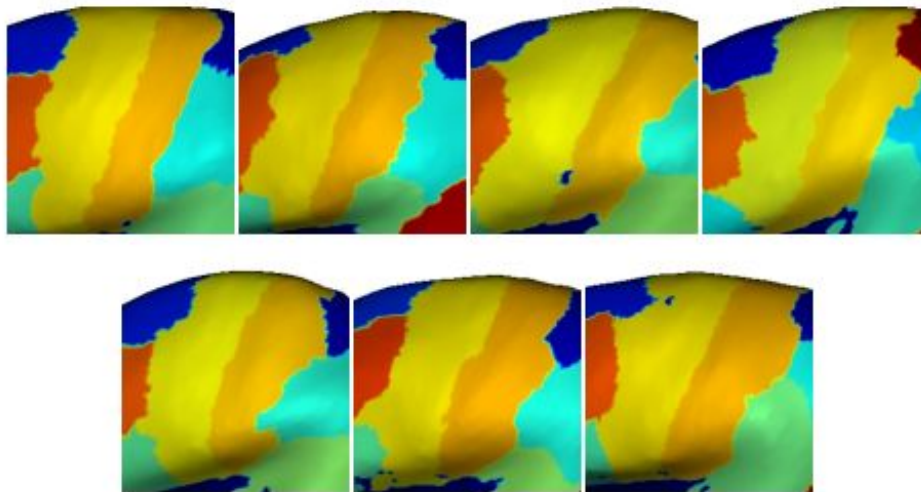


Figure 13 : les gyri situés près du sillon central présentent souvent des formes comparables

Concernant les sillons, on a vu que les gyri étaient globalement définis à l'aide de deux diagrammes de Voronoï dont le premier s'appuie sur les sillons. On observe effectivement que les sillons longent dans de nombreux cas la frontière des gyri (figure 12). En contraignant les coordonnées à leurs niveaux, l'information anatomique pourrait ressortir au travers de notre système surfacique, d'autant que leur stabilité inter-individuelle est garantie. De même, les graines gyrales, issues du premier diagramme de Voronoï, sont généralement situées bien au centre leurs gyri respectifs, et pourraient apporter une contribution stable à notre repérage.

#### *b. Première stratégie envisagée*

En plus de choisir des amers pertinents, il faudra bien sûr réfléchir à une méthode pour l'affectation des coordonnées « intermédiaires », cela avec un maximum de sens. Les travaux de recalage de textures offrent un grand nombre de solutions au problème. Nombreuses aussi sont les méthodes (voir B. Lévy, S. Haker, M. Floater, ...) qui visent à associer de manière bijective les points d'une surface à ceux d'une autre, le tout en tâchant de conserver au mieux les distances, les angles ou encore les aires. Mais dans notre optique de localisation, si l'unicité des associations nous importe grandement, la conservation des propriétés métriques



n'est pas une préoccupation majeure. Dans ce cas, la méthode de propagation inspirée par les travaux de C. Brechbuhler et al. [14] et reprise par C. Clouchoux et al. [11] pourrait sûrement satisfaire nos besoins. Elle s'appliquera toutefois dans notre cas à des surfaces ouvertes, contrairement au cas original.

Nous ne nous apprêtons vraisemblablement pas à élaborer une paramétrisation unique et générale valable pour tous les gyri, si l'on désire un tant soit peu qu'elle soit significative. La morphologie du gyrus est si variable de manière *intra-sujet* qu'il faut forcément choisir entre élaborer une seule paramétrisation générale basée sur très peu de critères anatomiques et considérer les gyri dans leurs individualités en exploitant au maximum l'invariance anatomique inter-sujets. On pourra ainsi librement envisager de mettre au point une collection de paramétrisations, au sein de laquelle les gyri seront tous représentés, voire regroupés par familles, en fonction de leurs similarités. C'est donc dans cette voie précise que nous engagerons probablement notre travail de recherche.

## **Conclusion du chapitre premier**

Le choix de nos amers anatomiques sera fondamental dans notre approche dans la mesure où, à partir du moment où l'on *propage* les coordonnées, « on sème du faux » entre les marqueurs. C'est de ce constat que vient tout l'intérêt de localiser de plus en plus le problème (d'abord au cortex, ensuite à l'hémisphère, maintenant au gyrus, ...), de sorte à cerner au maximum l'incertitude à intégrer.

Le projet qui vise à paramétriser la surface corticale est bien sûr né de la volonté de pouvoir se repérer sur une structure particulière, de façon indépendante du reste de l'organe. Mais il s'inscrit surtout dans l'optique qui tend à élucider la variabilité inter-individuelle (et intra-individuelle, notamment par la théorie des racines sulcales). On ressent en effet au travers de l'état actuel des travaux sur le sujet qu'une des motivations principales a été et reste la recherche d'invariance, de récurrence, aussi bien du point de vue anatomique, microanatomique ou fonctionnel. Le gyrus est un formalisme dont l'intérêt est clair pour les raisons évoquées dans ce mémoire, mais n'a rien d'une fin en soi : ses critères de définition sont encore trop flous à ce jour pour prétendre à dépasser formellement le problème de la variabilité corticale. Il constitue toutefois une solide étape intermédiaire que les formalismes futurs pourront venir préciser.

## Chapitre 2

### Travail de recherche

L'ensemble du travail a mis à contribution différents types de données. Pour commencer, nous avons travaillé au niveau de la surface située à l'interface matière grise / matière blanche, à savoir la « surface interne » du cortex. Cette option est parfois plus intéressante, notamment pour des motifs géométriques, par rapport à celle de la surface corticale extérieure (à l'interface cortex / méninges). Du point de vue anatomique, les deux surfaces sont comparables du fait de l'architecture « en colonnes » du cortex. C'est donc sur des maillages triangulés de cette surface que le travail a été mené. L'utilisation de textures affectant une valeur numérique à chaque point de ces maillages a de même été un moyen idéal d'afficher des résultats à même les surfaces.

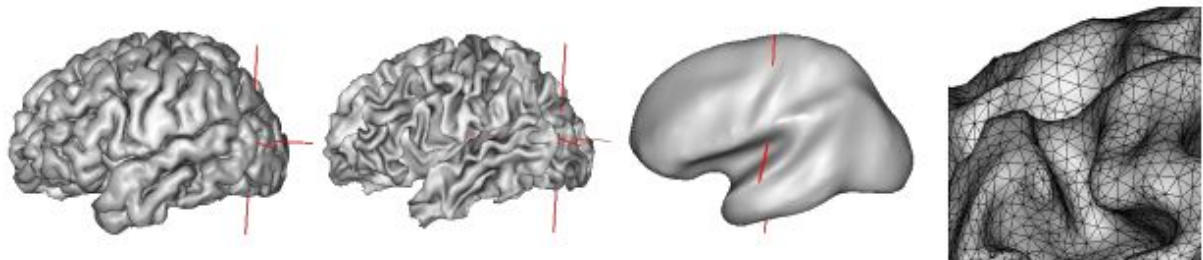


Figure 14 : diverses triangulations ; de gauche à droite : interface cortex / méninges – interface cortex / matière blanche – surface corticale gonflée – agrandissement d'une région corticale

L'ensemble des algorithmes mis au point au long du projet l'ont été au sein des bibliothèques de fonctions d'analyse et de traitement d'images médicales développées par l'équipe du Service Hospitalier Frédéric Joliot d'Orsay et rassemblées sous le sigle *AIMS*. Les opérations de visualisation ont été menées à l'aide de la plate-forme logicielle BrainVISA/Anatomist (<http://brainvisa.info/>). C'est par cette même plate-forme que nous avons produit les parcellisations en gyri par la méthode d'A. Cachia et al. [13,16].

La recherche d'invariance anatomique entre individus inspire clairement tout effort qui vise à comparer les surfaces corticales de différents sujets et a pour cela motivé notre travail. Dans ce cadre précis, elle débute au travers de l'analyse des relations de voisinages entre gyri sur une même parcellisation.

#### 1. Un modèle de description des relations de voisinages entre gyri

##### 1.1. Le gyrus en tant que carré unitaire

Notre but étant de paramétriser le gyrus dans un domaine fini à deux dimensions, il est raisonnable de voir le gyrus comme l'image d'un carré de côté de longueur unitaire (figure 15) par une transformation bijective (dont la réciproque serait à proprement parler une paramétrisation, au sens mathématique). Il s'agit ainsi en pratique d'automatiser l'association point-à-point entre le domaine du gyrus et le domaine paramétrique, d'une façon la plus pertinente possible du point de vue anatomique. On peut notamment commencer par déterminer les points du gyrus qui seront associés aux quatre arêtes du carré paramétrique : dans cette optique, on souhaite justement étudier au travers d'un nombre suffisant de

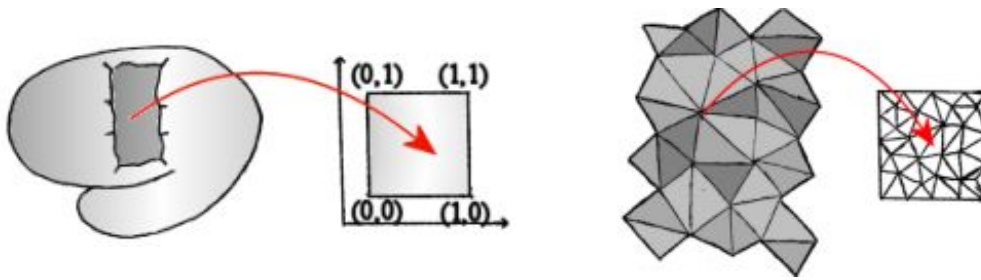


Figure 15 : l'objectif est d'associer une région donnée de la surface corticale à un domaine paramétrique approprié (schéma de gauche). L'association se doit d'être bijective pour éviter toute ambiguïté autour du repérage d'un point donné du maillage (schéma de droite).

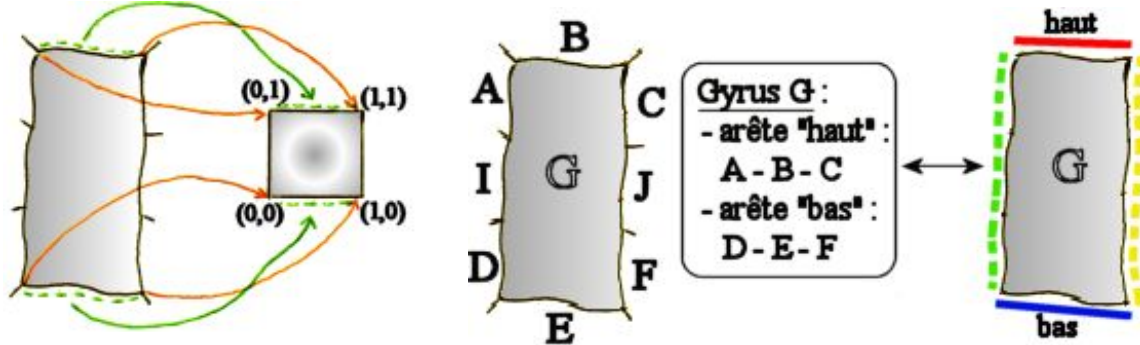


Figure 16 : à gauche : les flèches rouges désignent l'association entre les intersections gyrales et les « quatre coins » du domaine paramétrique, les vertes montrent l'association entre segments d'intersection et « arêtes » du domaine. A droite : ces associations peuvent aussi être décrites par des ensembles de gyri : les arêtes « gauche » et « droite » sont déduites des deux autres.

parcellisations la façon dont certains « motifs gyraux » se répètent. La figure 13 suggérait déjà au chapitre I la stabilité de certains voisinages au niveau du sillon central : certaines intersections entre gyri (comme celle entre les gyri précentral, frontal supérieur et frontal moyen pour ne citer qu'elle) existant chez tous les sujets étudiés, on peut librement penser à associer des intersections de ce genre aux points de coordonnées (0,0), (1,0), (0,1) et (1,1) du domaine paramétrique. On peut encore, de manière équivalente, vouloir associer à chaque gyrus un ensemble de six gyri, trois pour traduire une arête et trois pour l'arête opposée, comme schématisé sur la figure 16.

Cette idée se base donc sur la stabilité inter-individuelle des voisinages : toujours est-il que si certaines zones, comme près du sillon central, lui conviennent bien, on observe toutefois de nombreux « motifs gyraux » variant d'un sujet à l'autre, comme le suggère la figure 17 : l'image de droite souligne l'absence de frontière entre gyrus postcentral (en jaune orangé) et gyrus cingulaire (en bleu foncé), due à une surcroissance du gyrus précentral (en jaune clair), d'où l'intérêt de développer un modèle d'équivalence entre intersections.

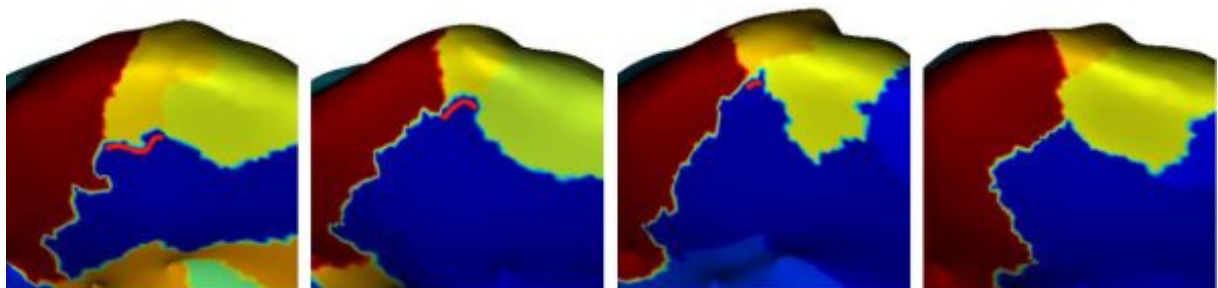


Figure 17 : la frontière (surlignée en rouge) entre le gyrus précentral et le cingulaire existe sur de nombreuses parcellisations, sans être une généralité, comme illustré à droite

## 1.2. Equivalence entre intersections

Selon le modèle introduit précédemment, un gyrus a pour image un carré unitaire pour peu que l'on renseigne les gyri formant les intersections que l'on lui choisit pour sommets. Toutefois, d'un individu à un autre, les gyri ne sont pas toujours formellement voisins des mêmes gyri : ainsi, pour reprendre la figure 16, si le bord « haut » d'un gyrus donné est associé à un segment de frontière entre ce même gyrus et le gyrus B, limité par les intersections G/B/A et G/B/C, comment traiter le cas de l'individu chez qui ces frontières / intersections n'existeraient pas ? C'est de ce problème que vient l'idée d'étendre ce modèle, de sorte à pouvoir définir des « intersections » entre gyri même lorsque ceux-ci « ne se touchent pas ».

En théorie, les frontières entre gyri naissent de la propagation de diagrammes de Voronoï [13,16], comme expliqué au chapitre I (2.3). L'étude montre que certaines zones d'intersections de gyri sont affectées en pratique par la progression différentielle des fronts du Voronoï : chez certains sujets deux fronts se rencontrent, mais d'autres fois deux autres fronts se rencontrent et empêchent les premiers de le faire (figure 18 gauche). Pour dépasser ce cas de figure, l'idée est alors, non plus de considérer les voisinages d'une manière trop obtuse (« tel gyrus touche forcément tel autre ») mais d'élargir le concept à quatre acteurs, comme le décrit la figure 18. L'hypothèse de l'équivalence des deux schémas d'intersections permet, dans le cas où les gyri A et B ne se touchent pas, de définir un point sur la frontière du gyrus en question, qu'on tient pour « homologue anatomique » du segment-frontière dans l'autre configuration. Une des arêtes associées au gyrus sera alors réduite à un point et le modèle gagne ainsi en robustesse en ce qu'il dépasse ces effets liés à la variabilité inter-individuelle.



Figure 18 : *propagation différentielle à partir des graines gyrales et équivalence des intersections*

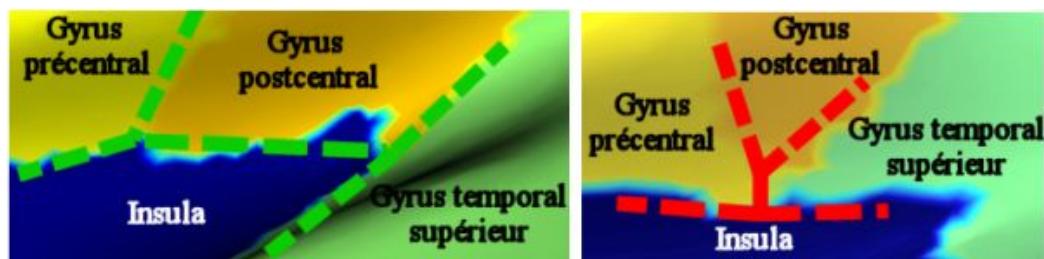


Figure 19 : *cas d'application de l'équivalence entre intersections : à droite, le gyrus postcentral ne touche plus l'insula mais les quatre mêmes gyri convergent dans la même région*

De cette façon, en exploitant cette équivalence de schémas d'intersection, une seule et même description de gyrus donnée est traduisible chez davantage de sujets.

## 1.3. Extension du modèle à son maximum

A ce stade, un objectif intéressant consiste à étendre ce modèle de sorte qu'il soit possible, à l'échelle du gyrus, de repérer des régions homologues d'un sujet à un autre même si aucun des gyri A, B, C ou D, pour reprendre le cas de la figure 18, ne touche l'un des trois autres. On



se livre ainsi en pratique à l'étude de toute une combinatoire des relations gyrales pour extraire les cas où l'homologie anatomique est défendable. Cette étude, détaillée à l'annexe A, fait état des relations entre un gyrus G donné et trois autres L, C et R. Grâce à elle, la référence à un seul triplet de gyri, comme il était évoqué au paragraphe 1.1, permet bien d'extraire un « segment », ou plutôt un ensemble de points (éventuellement réduit à un seul), à la frontière du gyrus considéré, et cela en couvrant un maximum de « motifs gyraux » envisageables.

On remarque jusque là que les homologies définies d'un sujet à un autre concernent unanimement les frontières gyrales, les intersections entre gyri. Il convient à ce titre de rappeler le sens anatomo-fonctionnel présumé de ces frontières gyrales : souvent confondues avec des sillons reconnus pour être stables entre individus, et sachant que certains de ces sillons sont clairement identifiés comme faisant la frontière entre deux régions fonctionnelles différentes (comme le sillon central séparant le sensoriel du moteur), il est justifié de vouloir les exploiter pour repérer le gyrus. Et avec une telle analyse des schémas d'intersections, toute zone de frontière entre deux gyri a de grandes chances de trouver sur toute autre surface corticale parcellisée la zone qui lui correspond *a priori* le mieux du point de vue anatomique, ou du moins gyral. Ces zones se matérialisent soit par un ensemble de points-frontières, soit le cas échéant par un seul point (voir annexe A).

Le taux de succès de la méthode traduit la pertinence du modèle : sur 133 gyri soumis à la paramétrisation (soit 19 gyri x 7 sujets x 4 arêtes à définir), 6 arêtes se sont avérées problématiques. Chacune de ces 6 arêtes se rapportait d'ailleurs à des gyri mal définis, situés dans la zone interhémisphérique, où les sillons sont parfois mal identifiés.

#### 1.4. Du diagnostic de l'intersection à la définition des quatre arêtes

Cette méthode permet *in fine* la création de deux listes de points correspondant aux arêtes associables au « haut » et au « bas du domaine paramétrique » que l'on souhaite superposer au gyrus. Comme expliqué précédemment, une arête correspond soit à une frontière entre gyri soit à défaut à un point isolé. Ainsi, idéalement, les points du bord du gyrus n'appartenant pas aux deux vecteurs de points déjà formés constituent deux et seulement deux composantes connexes, lesquelles donnent directement les deux arêtes restantes : l'association bijective entre le « bord » du gyrus et le « bord » du domaine paramétrique est alors complète. La figure 20 illustre quelques résultats : la couleur des arêtes n'a de sens que pour les distinguer.

La méthode est donc capable de diagnostiquer une collection de schémas d'intersections entre gyri pour peu qu'on explicite les gyri impliqués dans ces intersections. Ainsi, un fichier texte contient en pratique un descriptif générique associant à chaque gyrus à paramétrer deux triplets de gyri, à partir desquels les arêtes « haut » et « bas » sont déterminées (les deux autres arêtes en étant déduites). La méthode exploite cette information pour chercher les segments-frontières ciblés : au cas où elle ne les trouverait pas, la paramétrisation ne serait pas observée pour ce gyrus en question et la méthode passerait au suivant.

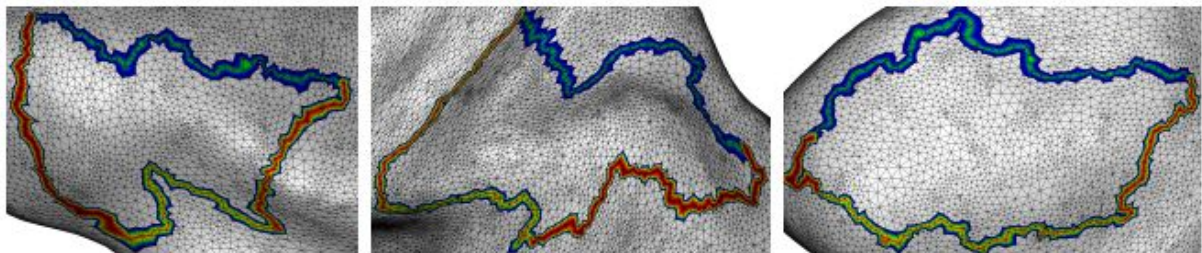


Figure 20 : les bords des gyri sont découpés en 4 parties, respectivement associés à une « arête » du domaine paramétrique

On pourrait bien sûr faire procès à la méthode, sa généralité s'arrêtant là avec celle du modèle de description des gyri. On envisage en effet difficilement de mettre en comparaison deux gyri paramétrisés dont les arêtes ont été définies à partir de modèles différents, donc de gyri différents. Mais c'est sans avoir à l'esprit que l'étude des voisinages gyraux précédemment évoquée a justement été menée dans le but d'avoir le plus rarement possible à modifier le modèle descriptif des gyri. L'annexe B donne d'ailleurs un modèle qui a très souvent convenu au cours du projet. Et au contraire, on peut y voir un avantage en permettant l'utilisation ou la mise au point de modèles de description des gyri appropriés aux jeux de parcellisations étudiées (d'autant que la méthode de parcellisation en gyri en amont de ce travail est toujours en cours d'évolution) : selon les protocoles, l'utilisateur est libre d'affiner le modèle descriptif au niveau de certains gyri et d'oublier ceux qui ne font pas l'objet de l'étude. On verra par exemple au paragraphe 4 que seul le gyrus précentral intéressait le protocole considéré.

Il est maintenant possible de diviser la frontière de tout gyrus en quatre ensembles de points. Ces points se voient ainsi déjà affectés d'une première coordonnée (0 ou 100) dans le repère surfacique  $([0,100] \times [0,100])$  mis au point. L'étape suivante consiste alors à repérer l'ensemble des points de l'intérieur du gyrus.

## 2. La diffusion des coordonnées

On souhaite que tout point d'un gyrus soit au final affecté d'un couple unique de coordonnées. Au chapitre I, nous projetions de mettre à contribution une méthode inspirée de C. Brechbuhler consistant à distribuer les coordonnées à la surface du cortex à la manière dont la chaleur se répartit dans un matériau [12]. Le paragraphe 1 offrant les moyens de diviser le bord du gyrus en quatre composantes, il s'agirait de définir des conditions limites à leur niveau avant de laisser « diffuser les coordonnées » sur la surface. C. Clouchoux et al. [18] envisagera peut-être à l'avenir, dans le cadre de son travail de paramétrisation globale de la surface corticale, de distribuer les deux coordonnées surfaciques de manière simultanée, sous la forme d'un couplage : il pourrait s'agir d'une solution à des problèmes de perte d'unicité au niveau de certains sillons à géométrie défavorable. Mais notre cas pose des contraintes différentes et l'affectation des coordonnées surfaciques de façon individuelle est une option raisonnable.

### 2.1. Modèle de propagation de la chaleur

#### a. Equation de Fourier

Dans l'optique de créer un système de coordonnées réparties de façon la plus homogène possible tout en rendant possible de définir un jeu de contraintes adaptées au problème anatomique, C. Clouchoux et al. exploite un modèle de diffusion thermique appliqué à ses triangulations : aussi, avons-nous opté pour cette méthode dans cette même perspective.

L'« équation de Fourier », également appelée « équation de la chaleur », relie la repartition spatiale à l'évolution temporelle des températures par l'expression :

$$\nabla(k \nabla T) + \dot{q}_p = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

avec  $k$ , coefficient de conduction thermique (propriété physique du matériau au point M),  
 $T$ , température au point M,  
 $\dot{q}_p$ , puissance calorifique spécifique,  
 $\rho$ , masse volumique,  
 $C_p$ , chaleur massique.

On formule plusieurs hypothèses : on considère la conductivité thermique constante et le milieu inerte ; il n'y a pas de production de chaleur. L'équation devient alors :

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

avec  $\alpha = k/(\rho C_p)$ , que l'on choisira égal à 1.

Etant donnée la nature discrète du maillage cortical, on considèrera une équation similaire, à éléments finis, inspirée des travaux de M. Chung et al. [19], plus appropriée :

$$\frac{T(M, t + \Delta t) - T(M, t)}{\Delta t} = \alpha \nabla^2 T(M, t)$$

$\Delta t$  est le pas temporel d'itération et  $\nabla^2 T(M, t)$  est une estimation locale du laplacien des températures au temps  $t$ . L'idée est ainsi d'approcher le régime stationnaire de la diffusion thermique, auquel  $\nabla^2 T(M, t)$  sera nul sur toute la surface.

### b. Résolution de l'équation en 1D

Prenons l'exemple d'une surface rectangulaire (plane) de longueur  $L$ , de largeur  $l$  : on choisit de maintenir un bord à  $100^\circ\text{C}$  et le bord opposé à  $0^\circ\text{C}$  (figure 21). Quel est le profil stationnaire en températures ?

Dans ces conditions, supposer la dépendance spatiale de la température réduite à une seule direction simplifie l'équation différentielle et l'on obtient alors comme solution générale :

$$T = C_1 x + C_2$$

On a comme conditions aux limites  $T(x=0) = 0^\circ\text{C}$  et  $T(x=L) = 100^\circ\text{C}$ . La diffusion est considérée comme étant adiabatique : les deux bords restants ne laissent pas fuir la chaleur. On obtient donc :

$$T(x) = \frac{100}{L} x$$

Ce résultat motive le choix de cette méthode : nous aspirons précisément à une distribution linéaire, homogène, des coordonnées à la surface du gyrus. Maintenant que le bord de tout gyrus peut être divisé en quatre composantes, l'étape suivante consiste à les contraindre à  $0^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$  (successivement, par couples d'arêtes opposées) en températures et

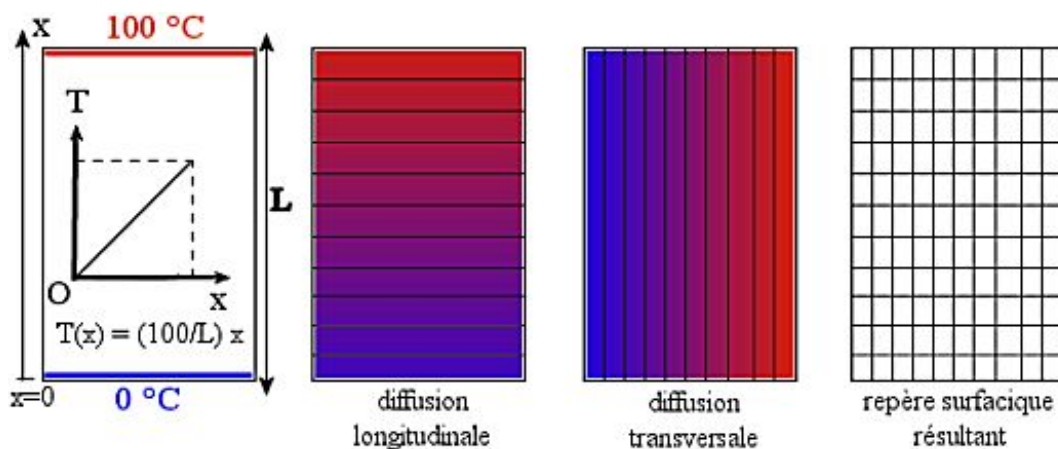


Figure 21 : de gauche à droite : profil des températures sur une surface rectangulaire aux bords contraints – représentation du régime stationnaire après diffusions longitudinale et transversale – représentation du repère surfacique obtenu après les deux diffusions



à laisser la « propagation thermique » s'effectuer. L'intérêt de cette méthode itérative naît de la complexité du calcul direct d'un profil de températures sur une surface aussi convoluée que le cortex cérébral : d'une itération à la suivante, la chaleur diffuse en respectant la géométrie corticale, tout en s'approchant progressivement d'une distribution stable. On considèrera à partir de maintenant que les coordonnées du repère surfacique élaboré seront toujours comprises entre 0 et 100, en abscisses, comme en ordonnées.

## 2.2. Descriptif pratique de la méthode

Une étape préalable à la diffusion consiste à calculer un ensemble de poids caractérisant tout couple de voisins du maillage, lesquels serviront à l'évaluation des laplaciens : l'opération est effectuée par une méthode par éléments finis appliquée à un maillage à topologie sphérique. Les poids sont calculés d'une façon qui exploite la géométrie du maillage de sorte que la diffusion à la surface du cortex sera implicitement influencée par ses nombreux plis, soit une manière supplémentaire d'intégrer de l'information anatomique à la paramétrisation.

Un maillage réduit au gyrus d'intérêt est alors extrait du maillage cortical ; il en va de même pour l'ensemble de poids apparentés aux couples de points du gyrus. On crée ensuite une texture décrivant l'état initial de notre système : comme suggéré dans le paragraphe 2.1, les points des « arêtes » concernées sont respectivement initialisés à 0°C et 100°C. L'initialisation des autres points sera un des objets du paragraphe suivant.

Puis, les laplaciens sont évalués en tout point du gyrus : sur une surface discrète aussi convoluée, le laplacien se calcule en un point par une somme pondérée fonction à la fois de la température en ce point, des températures voisines et des poids entre le point et chacun de ses voisins.

$$\nabla^2 T(M, t) = \sum_{i \in G} w_i (T(P_i, t) - T(M, t))$$

avec G, l'ensemble des indices des points du gyrus,  
 $P_i$ , le point d'indice i  
 $w_i$ , le poids liant le point M au point d'indice i.

On peut alors appliquer la formule présentée en 2.1.a pour obtenir la texture de l'itération suivante. Il ne reste alors plus qu'à rétablir les contraintes, qui auront diffusé d'une itération à la suivante, et à répéter le processus jusqu'à établissement du régime permanent.

## 2.3. Influence des paramètres de la diffusion

### a. Importance de l'initialisation

Dans nos circonstances, l'état initial du système n'a pas d'effet sur l'état du régime permanent en soi. En revanche, il en dépendra le nombre d'itérations à observer avant d'atteindre l'équilibre. D'où l'intérêt de choisir un état initial le plus proche possible du régime stationnaire. La comparaison entre une texture initiale où tous les points sont à température nulle (excepté les points de la contrainte à 100°C) et une texture où tous les points sont à 50°C (excepté les points des deux contraintes à 0°C et 100°C) peut être rapidement faite : dans le premier cas, l'équilibre sera atteint lorsque l'énergie de la contrainte à 100°C aura diffusé jusqu'au bord opposé ; dans le deuxième, la propagation se fera aussi bien à partir de la contrainte chaude que de la contrainte froide. On comprend ainsi schématiquement qu'une initialisation à 50 °C mènera à un régime stationnaire en un temps réduit de moitié (comme le montre la figure 22, qui compare les effets des différents états initiaux).

Mieux qu'une texture uniforme, la carte des distances par rapport à la contrainte froide offre un compromis intéressant : rappelons qu'elle équivaut même au profil stationnaire dans l'exemple du paragraphe 2.1.a. Nous avons souhaité opter pour elle comme texture initiale et observer les effets sur le temps écoulé avant l'équilibre.

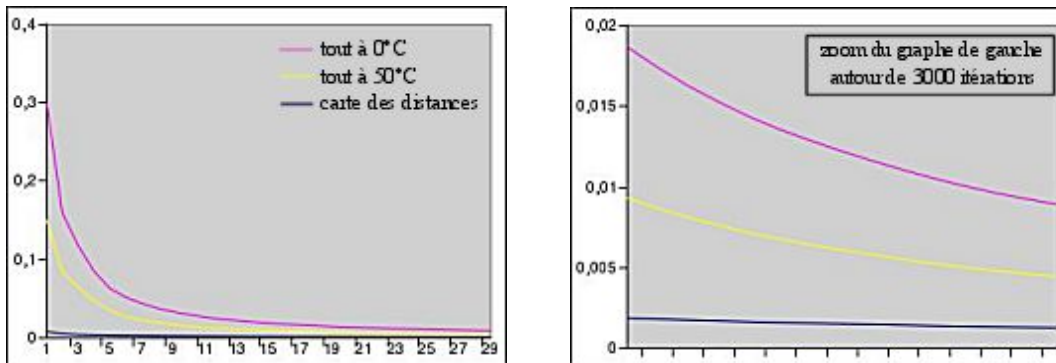


Figure 22 : différence maximale en température en un point d'une itération à la suivante sur tout le gyrus (abscisses : nombre d'itérations en centaines ; ordonnées : différence en « °C »)

### b. Influence du pas temporel

Le choix du pas temporel d'itération doit être réfléchi : un pas temporel petit rapproche d'un modèle à temps continu, mais conduit à une propagation « lente » ; un pas temporel grand accélère globalement la propagation, mais passé un certain stade, il perd tout son sens et rend le système instable. La figure 23 montre les effets de différents pas temporels sur une même propagation. Un pas de 0.05 offre un compromis raisonnable entre vitesse et précision.

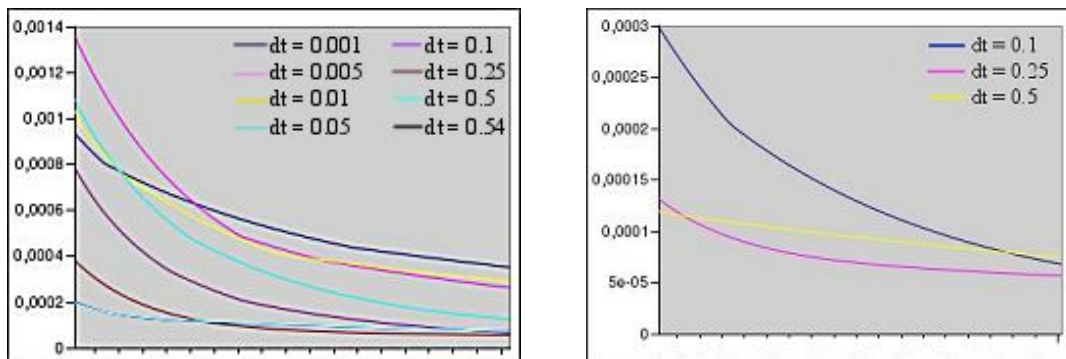


Figure 23 : le choix du pas temporel a des effets sur la vitesse de la convergence mais aussi sur sa qualité : le graphe à droite illustre la façon dont un dt élevé, s'il accélère premièrement la propagation, conduit in fine à une convergence plus lente

### c. Influence du critère d'arrêt

Le régime stationnaire est atteint lorsque la température reste constante en chaque point d'une itération à la suivante. Cette condition peut être aussi bien reformulée en termes de laplaciens grâce à l'équation de Fourier : ainsi, le régime est permanent lorsque le laplacien s'annule en tous les points de la texture. Plusieurs options sont de fait envisageables pour conditionner l'arrêt de la propagation (figure 24).

Vouloir minimiser le maximum des laplaciens ne s'avère pas comme étant le critère le plus efficace. En effet, il arrive un stade où le laplacien maximal converge vers une valeur non nulle : on n'a alors plus accès à l'évolution du système. Le phénomène se décrit comme un

effet du rétablissement des contraintes à chaque itération, qui s'oppose en quelque sorte à l'homogénéisation des températures, induisant des laplaciens « impossibles à annuler ». Pour cette raison, l'observation de la moyenne des laplaciens sur la surface du gyrus convient mieux : cela n'empêche pas pour autant les maxima d'en influencer la valeur, c'est pourquoi nous décidons de choisir le critère naturel visant à minimiser la différence maximale en température entre un point M à l'instant t et ce même point M à l'instant  $t + \Delta t$ . Le critère renseigne correctement sur l'évolution temporelle de la propagation.

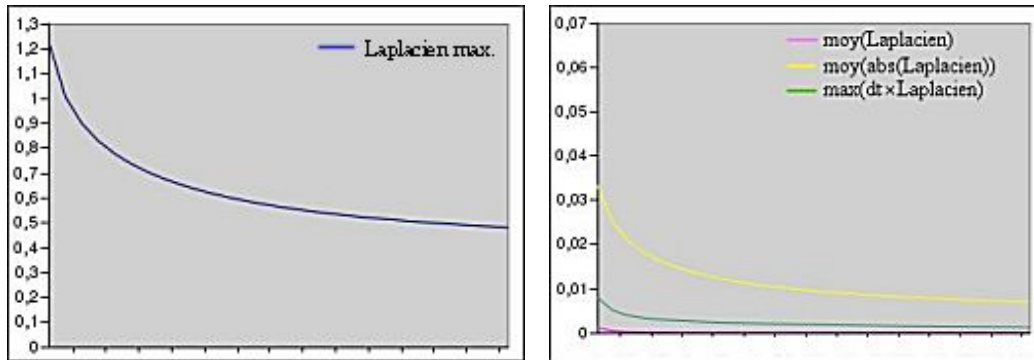


Figure 24 : évaluation de différentes conditions d'arrêt en fonction du nombre d'itérations

On sait à présent diffuser à la surface de chaque gyrus en contraignant successivement ses arêtes opposées : on dispose ainsi, déjà à ce stade, d'un système de coordonnées surfaciques pour chaque gyrus. Le paragraphe suivant traduit en particulier les efforts effectués pour rendre la paramétrisation encore plus pertinente en termes anatomiques.

### 3. Contraintes additionnelles

A ce niveau, la paramétrisation du gyrus est explicitement contrainte en quatre points (associables aux coordonnées (0,0), (0,100), (100,0) et (100,100)) ainsi que sur le reste du bord, dont une seule coordonnée sur deux est affectée d'avance. Ces quatre points s'apparentant à des intersections entre gyri, il convient maintenant de considérer l'existence dans certains cas d'intersections gyrales supplémentaires, qui mériteraient autant que les quatre autres d'être repérées explicitement, au nom de leur prétendue stabilité anatomique, inter-individuelle. Evidemment, l'ajout de telles contraintes doit également être pensé au cas par cas, gyrus par gyrus : elles viennent en pratique préciser le modèle de description du gyrus introduit au paragraphe 1. Pour se faire, nous avons successivement envisagé trois techniques distinctes.

#### 3.1. Contraintes ponctuelles

Les intersections entre gyri ont, quelles qu'elles soient, toujours au moins une coordonnée contrainte, par le fait qu'elles appartiennent inévitablement au bord du gyrus. L'objectif est donc de décider d'avance de la deuxième coordonnée de tels points, puis de laisser diffuser selon la méthode détaillée précédemment. On ajoute ainsi aux deux segments 0 et 100°C une ou plusieurs contraintes ponctuelles, associées aux intersections nouvellement considérées.

Ce procédé a pour avantage, contrairement aux suivants, de ne nécessiter qu'une seule étape de diffusion : les conditions sont définies préalablement et la diffusion est chargée de trouver l'équilibre conséquent. Toutefois, l'utilisation de ce procédé conduit à un problème de taille : l'expérience montre qu'en donnant à l'intersection une température trop différente de

celle qu'elle reçoit sans contrainte supplémentaire, l'influence de ce point s'avère trop faible, par rapport à celle des segments 100°C et 0°C, pour attirer le front de même température issu de l'équilibre entre les deux flux principaux. L'état final donne alors plusieurs iso-courbes distinctes, ce qui compromet la nature bijective de la paramétrisation. La figure 25a schématise le résultat d'une diffusion sans contrainte supplémentaire : les courbes iso-températures sont « parallèles » aux bords contraints. La figure 25b montre un état final modifié, résultant de la diffusion en ayant contraint la température du point signalé ; la figure 25c en exhibe la conséquence directe : trois points distincts de la surface sont finalement affectés des mêmes coordonnées, ce qui invalide la paramétrisation. La figure 25d donne une illustration du phénomène observé en pratique. Confronté au problème de la variabilité interindividuelle, on peut difficilement garantir le degré de stabilité de la dite-intersection à l'échelle du gyrus. Devant cet état de fait, on en arrive à considérer le procédé des contraintes iso-extraites, lequel élude clairement de tels inconvénients.

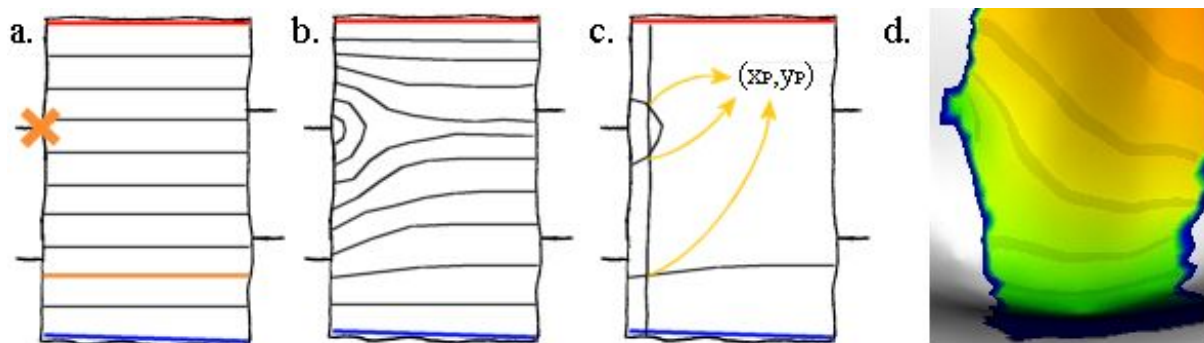


Figure 25 : la croix désigne la contrainte ponctuelle (a). En lui imposant la même température que le front de couleur orange, on obtient un état final (b) qui, une fois la diffusion transversale réalisée, cause la perte de l'unicité des couples de coordonnées (c).

### 3.2. Contraintes iso-extraites

Un moyen de garantir à tout prix l'unicité de tout couple de coordonnées sur le gyrus consiste à définir des contraintes sous forme de courbes traversant le gyrus : chacune d'entre elles partitionne le gyrus en deux zones distinctes, l'une (où se trouve la contrainte à 100°C) où les points seront tous plus chauds et l'autre (où se trouve la contrainte à 0°C) où les points seront tous plus froids. Du fait de cette condition médiane, il n'y aura aucun échange concret d'énergie entre les deux zones : le scénario de base décrit au paragraphe 2 est en fait reproduit dans chacune d'entre elles avec, bien entendu, des conditions aux limites différentes.

L'idée est en fait de procéder à une première diffusion, de laquelle on extraira l'ensemble de points appartenant « au mieux » à une courbe isoparamétrique de valeur donnée. On relance alors la diffusion en ayant donné aux points de cette courbe une valeur différente, imposée. Il n'y a d'intérêt à tout ceci que si la courbe est choisie de façon pertinente, notamment au niveau d'un marqueur anatomique. On veille ainsi à considérer les courbes parvenant directement à des points d'intersection entre gyri, tels que celui signalé par exemple par une croix sur la figure 26a : on souhaite en pratique que cette courbe désignée porte toujours la même coordonnée, ceci quel que soit le sujet. Pour autant, le choix des valeurs des contraintes ne peut être fait au hasard, comme le suggèrent les figures 26c et 26d : dans certains cas défavorables impliquant la définition de plusieurs contraintes au lieu d'une seule, la variabilité spatiale d'intersections situées sur des frontières opposées du gyrus peut conduire à des configurations paradoxales où une courbe contrainte à 40°C se retrouve entre celle à 100°C et celle à 75°C.

Il est bien sûr regrettable d'imposer une étape de diffusion supplémentaire ; mais cette manière de procéder permet d'imposer aux contraintes une géométrie résultant de la diffusion, qu'on sait influencée par la géométrie corticale. Il faut donc y voir aussi une façon particulière de traduire/conservé l'information anatomique au travers des contraintes.

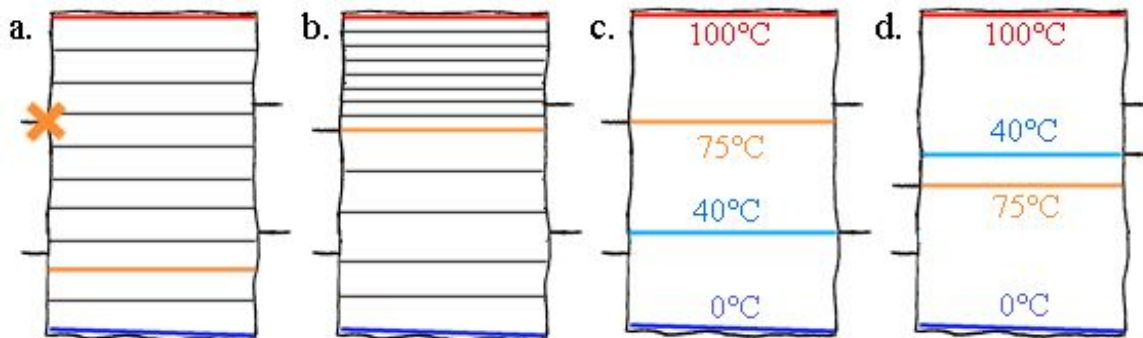


Figure 26 : on souhaite imposer à l'iso-courbe parvenant au marqueur signalé une coordonnée fixe quel que soit le sujet (a) : l'homogénéité de la diffusion conséquente s'en trouve logiquement affectée (b). En (c) et (d) est mis en évidence le type de paradoxes auxquels la méthode est confrontée avec plusieurs contraintes.

### 3.3. Contraintes mixtes

On peut encore envisager autrement d'ajouter des contraintes au repère surfacique. Car si la géométrie des courbes iso-températures évoquées précédemment traduisent le résultat de la première diffusion (sans contrainte supplémentaire), on peut s'interroger sur la pertinence d'une contrainte qui, issue au départ d'un seul point, à savoir une intersection gyrale, modifie uniformément le profil de coordonnées sur toute la « largeur » du gyrus. La figure 28 évoque explicitement ce phénomène. Dans le doute, un compromis a été pensé pour à la fois contraindre le marqueur anatomique (l'intersection gyrale) et respecter le résultat de la première diffusion sans contraintes additionnelles.

Après avoir diffusé une première fois sur la longueur et sur la largeur du gyrus, on dispose déjà d'un repère surfacique sans contrainte supplémentaire. En projetant alors le gyrus sur le domaine paramétrique, l'idée est d'en extraire un ensemble de points situés au plus près d'une droite traversant le domaine : en choisissant une droite reliant le point d'intersection au point de l'arête opposée ayant la température la plus voisine de la valeur qu'on souhaite affecter au point d'intersection, on obtient une contrainte qui s'inspire à la fois du marqueur anatomique et de la diffusion originale. En cela, la paramétrisation se trouvera à mi-chemin entre une

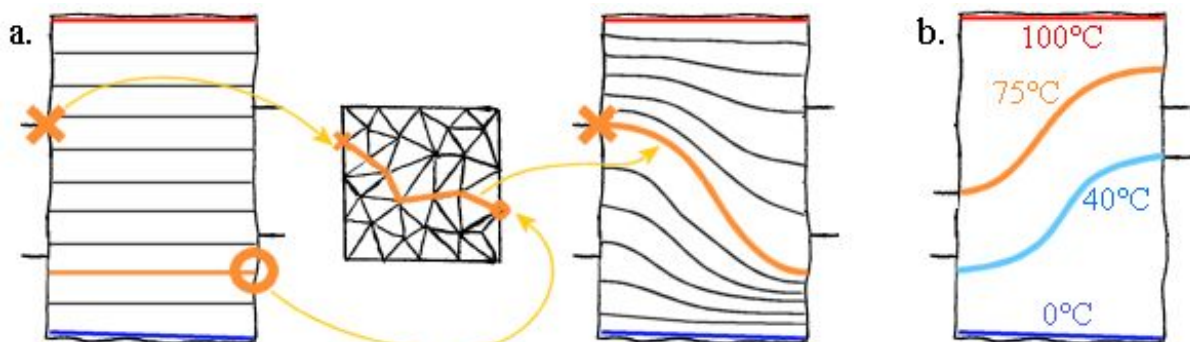


Figure 27 : contraintes mixtes : on extrait un ensemble de points reliant le marqueur anatomique (croix), au point du bord opposé (cercle) affecté, par la première paramétrisation sans contraintes supplémentaires, de la valeur qu'on désire donner à la contrainte.



diffusion ordinaire, comme décrite au paragraphe 2, et une diffusion avec contraintes iso-extraites. Et la définition automatiquement intelligente des contraintes (en respect les unes des autres – voir figure 27b) empêchent toute situation inconsistente comme celle évoquée au paragraphe précédent. Maintenant, laquelle parmi ces deux dernières techniques offrent le plus de sens anatomique au repère surfacique ? Cette question fait précisément l'objet d'une des parties du paragraphe suivant.

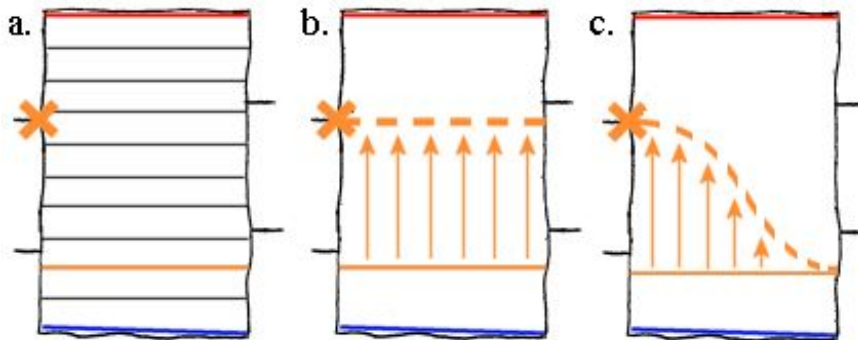


Figure 28 : comparaison entre contraintes iso-extraites et mixtes : l'influence du premier type s'étend sur toute la « largeur » du gyrus (b) alors que le deuxième agit différemment selon la distance au marqueur anatomique (c).

#### 4. Validation, mises en application et perspectives

##### 4.1. Paramétrisations en images

La figure 29 offre quelques illustrations des résultats pratiques de la méthode de paramétrisation de la surface corticale à partir d'une parcellisation en gyri, appliquée au gyrus précentral chez trois sujets différents. Au haut de la page, on trouve la parcellisation en gyri de l'hémisphère cortical gauche de chacun des sujets. L'encadré qui suit montre les diffusions « longitudinale » et « transversale » (avec contraintes mixtes) des coordonnées sur le gyrus précentral en particulier. Il faut bien sûr souligner que les termes évoquant la longueur ou la largeur d'un gyrus sont à comprendre dans le cadre du modèle de description par arêtes introduit au paragraphe 1 : il est autrement inconcevable de donner d'un point de vue formel toute dimension de ce type au gyrus, même si certains gyri comme le précentral se prêtent bien à cette image de par leur forme allongée. Le deuxième encadré représente les diffusions affichées sur les surfaces corticales gonflées. Enfin, au bas de la page se trouvent un agrandissement d'une diffusion « longitudinale » sur surface gonflée ainsi qu'une paramétrisation d'un hémisphère dans sa totalité, présentée sous une forme particulière : en effet, C. Clouchoux et al. a tout récemment mis au point une méthode, inspirée de l'algorithme du Marching Cube, permettant de recouvrir la surface corticale de tubes, lesquels parcourent, à raison d'un pas donné, toutes les courbes iso-températures identifiables sur une texture. Cette technique de visualisation élimine les artefacts introduits par l'observation des textures plaquées telle qu'elle est implémentée.

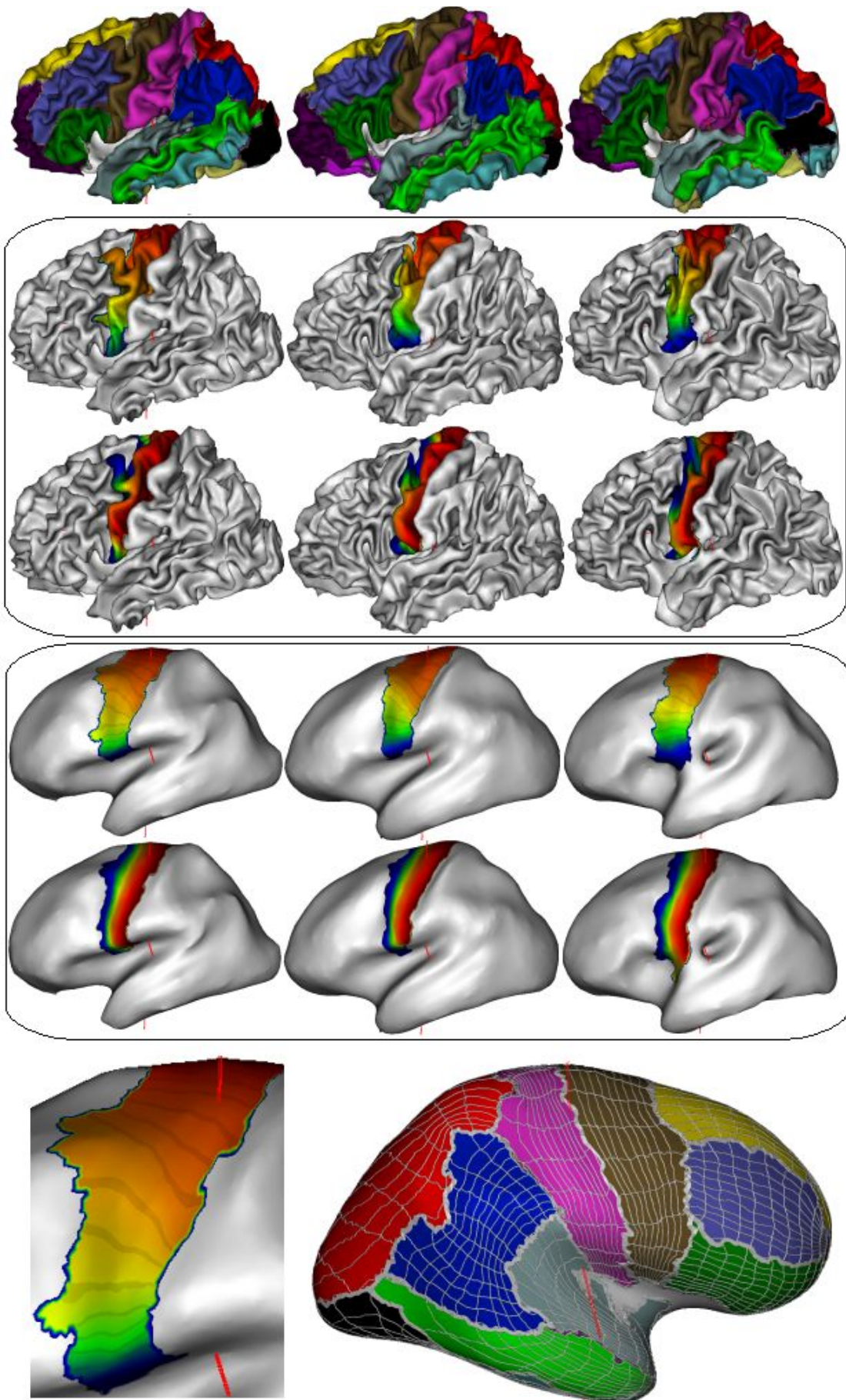


Figure 29 : illustrations de différents résultats de la méthode de paramétrisation



## 4.2. Mises à plat de gyri

A partir du moment où la paramétrisation affecte tout point du maillage cortical d'un couple de coordonnées, il est parfaitement possible d'exploiter ces coordonnées surfaciques pour projeter tout gyrus sur un plan. La figure 30 illustre le résultat du dépliage d'un gyrus particulier. On remarque que la projection s'intègre dans un carré dont les coins sont sectionnés, ce qui s'explique par la manière dont les « arêtes » du gyrus sont définies. En effet, en toute rigueur, aucun point du maillage n'est affecté des coordonnées (0,0), (0,100), (100,0), ni (100,100) : pour espérer obtenir de tels points, il aurait fallu que les « arêtes » consécutives du gyrus se confondent au niveau de leurs extrémités respectives, condition pour le moins problématique dans le cas notamment où l'une des arêtes en question se voit réduite à un seul point (de quelle valeur serait-il alors affecté ?). Soulignons néanmoins que l'absence de tels couples de coordonnées dans la paramétrisation ne génère aucune inconsistance du point de vue aussi bien mathématique qu'anatomique.

On peut promouvoir la mise-à-plat de gyri de la même façon que D. Van Essen et al. vante le dépliage de toute la surface corticale [7,9] : même en admettant que les problèmes de visualisation sont tout de même plus réduits à l'échelle gyrale qu'à l'échelle de l'organe entier, la technique peut être intéressante pour permettre la visualisation de tout un gyrus d'un seul coup d'oeil, en dépit de ses replis, et ainsi offrir une approche supplémentaire aux comparaisons inter-individuelles.

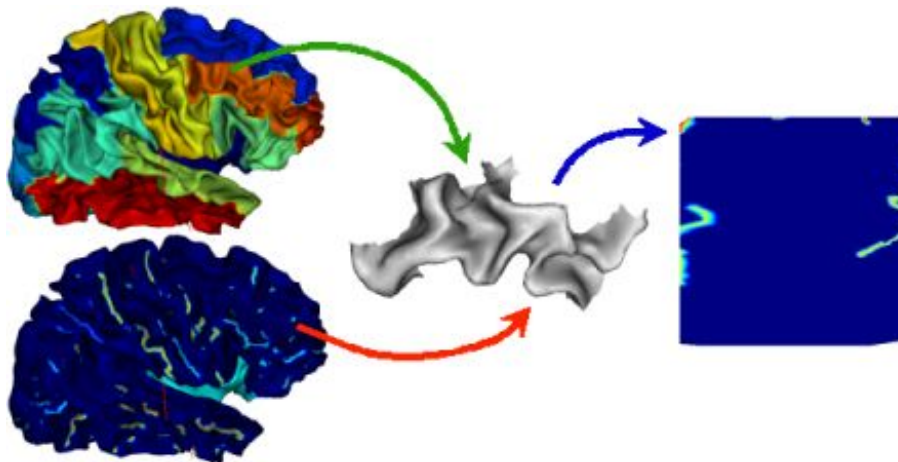


Figure 30 : à partir d'une parcellisation en gyri et d'une texture quelconque (en l'occurrence, des projections de sillons), on peut extraire le gyrus et le « mettre à plat » à l'aide des coordonnées surfaciques

## 4.3. Validation à base de données fonctionnelles

### a. Projection de cartes somatotopiques dans le repère surfacique

Pour mettre en évidence l'information anatomique portée par cette nouvelle méthode de paramétrisation, il est intéressant de projeter sur le nouveau repère surfacique d'autres données en rapport avec l'anatomie et d'analyser leurs nouvelles coordonnées. Par exemple, en faisant l'hypothèse de la pertinence anatomique du système de coordonnées, un même foyer associé à une fonction précise devrait, chez deux sujets différents, être repéré de manière équivalente, en tenant toutefois compte d'une certaine variabilité fonctionnelle. Ainsi, à partir de données fonctionnelles issues du centre IRM fonctionnelle de Marseille, une première étape de validation de la méthode a pu être menée. Ces données comprennent l'anatomie des sujets

ainsi que des cartes fonctionnelles produites par le logiciel SPM (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) à la suite de protocoles détaillés ci-après.

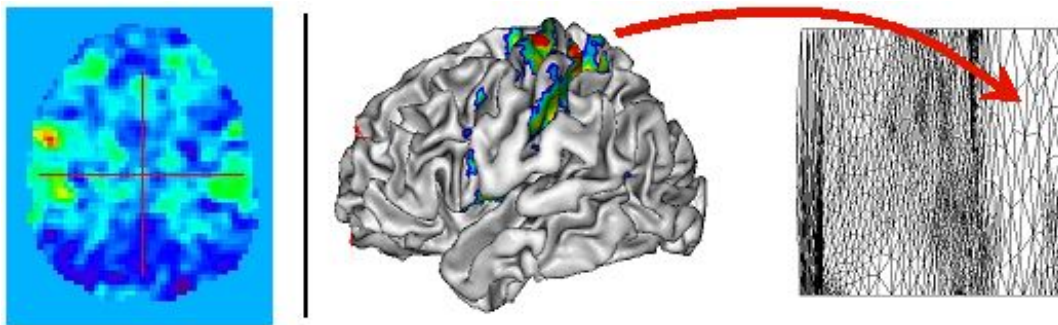


Figure 31 : les différentes étapes de traitement des données fonctionnelles ; de gauche à droite : seuillage de la carte fonctionnelle pour cibler le foyer d'activation (en rouge) – projection de l'activation sur le maillage cortical – analyse dans le repère surfacique du gyrus approprié

Les opérations préalables consistent à construire les triangulations corticales à partir des images IRM, à exécuter la reconnaissance automatique des sillons, avant de lancer la parcellisation en gyri [13,16]. Puis, on applique la méthode de paramétrisation et l'on repère successivement les surfaces corticales des neuf sujets à disposition. Les cartes fonctionnelles, de la façon dont elles sont élaborées, montrent généralement de l'activation éparpillée sur toute la surface : il s'agit dans notre optique de ne nous intéresser qu'aux foyers à forte activation, d'où l'idée de seuiller les cartes de sorte à cibler les activations. On ne projette ainsi sur les maillages corticaux que les activations cérébrales dépassant une valeur fixe en intensité. Il est alors possible de confronter les coordonnées surfaciques des maxima d'activation d'un sujet à l'autre pour évaluer l'invariance anatomique du nouveau repère.

J-L Anton et al. a déjà analysé ces mêmes données : provenant de protocoles de somatotopie, elles se prêtent librement à une projection sur le sillon central que l'on place ensuite dans le repère (volumique) de Talairach [1]. Ces données traduisent l'activation cérébrale observée au cours de simples mouvements de différentes parties du corps (en particulier le visage, le coude, le pouce, l'index, l'auriculaire et le pied). Ces activations sont connues, si bien qu'elles sont souvent représentées sous la forme du schéma de l'Homunculus de Penfield [20] (figure 33), qui répertorie sur toute une bande corticale les zones motrices et sensorielles associées à cette région. Les projections sur le sillon central s'avèrent concorder avec le schéma de l'Homunculus, et les résultats graphiques illustrent la stabilité anatomique des foyers fonctionnels : malgré l'utilisation d'un repère volumique et non pas surfacique, les maxima d'activation se regroupent en fonction de la zone corporelle sollicitée. On peut maintenant s'attacher à réitérer ces analyses en exploitant cette fois le repère surfacique.

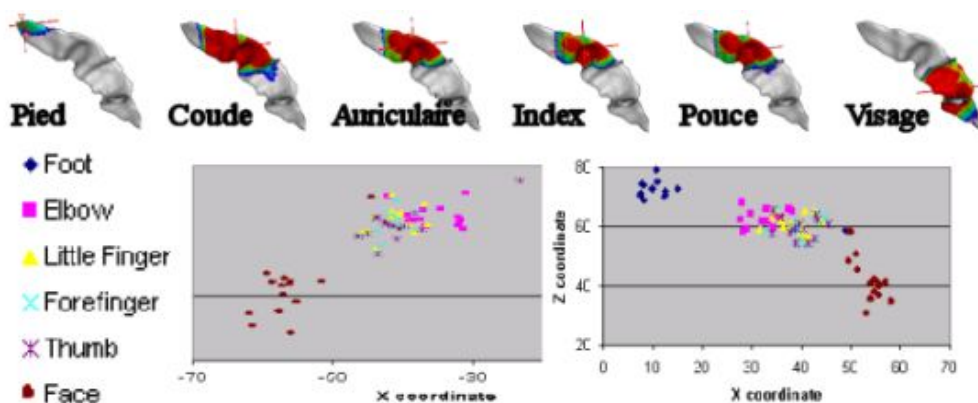


Figure 32 : les foyers fonctionnels dans le repère de Talairach montrent un arrangement spatial en fonction de la zone corporelle sollicitée

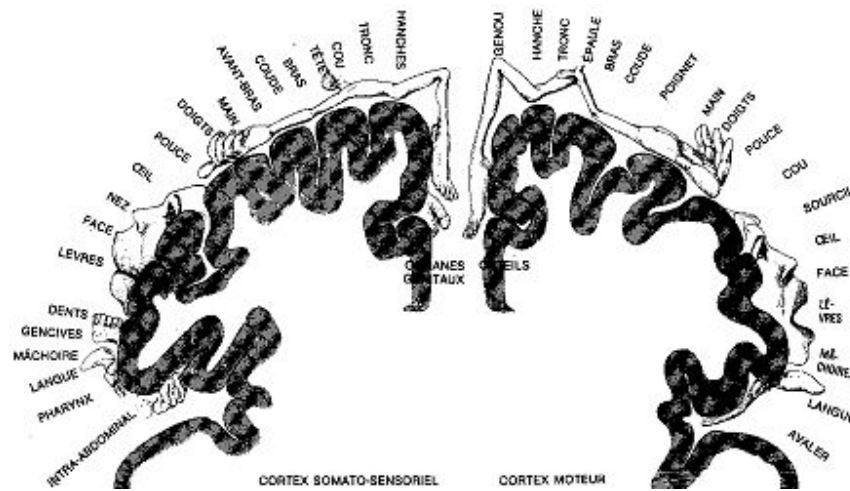


Figure 33 : *Homonculus de Penfield*

Dans un premier temps, nous évaluons la paramétrisation des gyri sans contraintes supplémentaires. Les sujets étudiés étant tous droitiers, nous considérons les données fonctionnelles issues du protocole « moteur droit », qui génère usuellement des réponses ciblées et fortes, au niveau du gyrus précentral, le long du sillon central, dans l'hémisphère gauche. L'idée est ainsi de relever les coordonnées affectées par la paramétrisation aux maxima d'activation pour chacun des six types de mouvements, chez l'ensemble des neuf sujets étudiés. On obtient le graphique suivant :

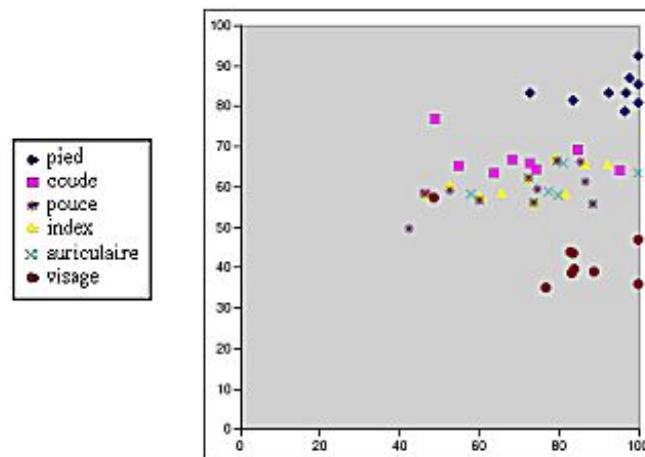


Figure 34 : *repérage des foyers d'activation sur le gyrus précentral sans contraintes supplémentaires*

On ne dispose pas vraiment, à ce niveau, de moyens objectifs d'évaluer numériquement la pertinence du repérage, mais on peut toutefois observer sans peine le regroupement en ordonnées des foyers d'activation selon la zone du corps mise en mouvement. La distribution en abscisses reflète en revanche la variabilité fonctionnelle existant entre les individus : l'activation a lieu au même niveau le long du sillon central (repéré quant à lui le long de l'axe ( $x=100$ )), mais la distance du foyer au sillon varie d'un sujet à l'autre. Cette variabilité n'était logiquement pas déductible des projections sur le sillon lui-même observées sur la figure 32. Soulignons que l'ensemble des analyses statistiques qui vont suivre ne s'attachent qu'aux ordonnées des points considérés.

*b. Etude comparative des deux techniques de contraintes*

Le paragraphe sur les contraintes supplémentaires s'est conclu en posant la question de

leur pertinence anatomique. On peut maintenant réitérer le protocole mis en pratique ci-avant et observer les effets des contraintes sur les statistiques obtenues. Le gyrus précentral faisant intersection avec les gyri frontaux supérieur, moyen et inférieur, deux contraintes ont été introduites au niveau du point d'intersection « précentral / frontal supérieur / frontal moyen » et « précentral / frontal moyen / frontal inférieur ».

Les écarts moyens *en ordonnées* des différents points expriment mieux que les graphiques les effets des différents types de contraintes additionnelles utilisées : en effet, on observe sur la figure 37 que les écarts moyens en ordonnées des foyers reliés à un type de mouvement donné apparaissent d'une manière générale plus bas avec contraintes mixtes que sans contraintes supplémentaires ; en revanche, cette observation ne s'applique pas clairement à l'utilisation d'un repère à contraintes iso-extraites. Il semble donc permis de reconnaître une contribution des contraintes mixtes à la paramétrisation en matière d'invariance anatomique inter-individuelle, en affectant des coordonnées similaires à des foyers fonctionnels homologues d'un sujet à l'autre.

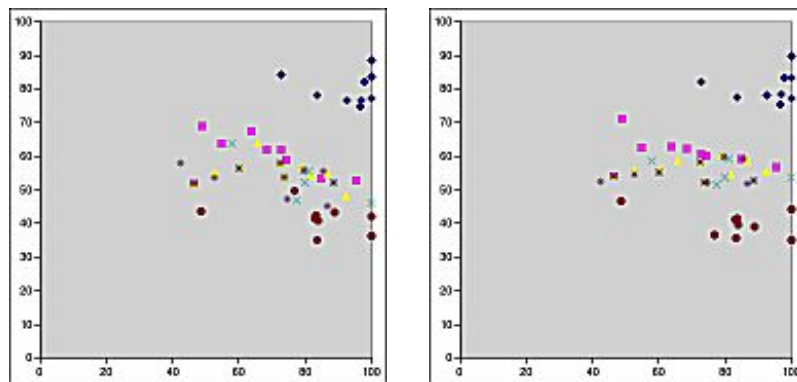


Figure 35 : repérage des foyers fonctionnels sur le gyrus précentral chez plusieurs sujets après introduction de contraintes mixtes (à gauche) ou iso-extraites (à droite)

### c. Définition de contraintes au niveau de foyers fonctionnels

Une étape intéressante a été la définition de contraintes supplémentaire au niveau, non pas d'une intersection entre gyri, comme précédemment, mais d'un foyer dont on sait par hypothèse qu'il correspond à une « fonction » précise, telle que le mouvement d'une partie du corps, pour reprendre le contexte de la somatotopie. De la sorte, les coordonnées de ce foyer deviennent logiquement invariantes quelquesoit le sujet examiné : reste à évaluer les effets induits sur le reste du gyrus et de sa paramétrisation. Dans cette optique, nous avons décidé de réétudier la paramétrisation du gyrus précentral gauche en ajoutant, en plus des contraintes mixtes, une contrainte au niveau du maximum d'activation lié au mouvement de l'index droit. On s'attend alors à ce que ces foyers portent les mêmes ordonnées, s'agissant précisément du but de la contrainte. Il se trouve en pratique que cette observation dépend de la technique de contrainte utilisée : de manière concrète, la façon dont les contraintes mixtes sont définies impliquent que les courbes contraintes ne passent pas toujours par le maximum d'activation, ce qui engendre de petits écarts moyens, non-nuls. En revanche, si la « contrainte fonctionnelle » est définie par la technique iso-extraite, alors c'est la courbe isoparamétrique passant par le foyer fonctionnel qui est contrainte, donnant lieu en toute rigueur à un écart moyen nul autour de cette activation motrice (figure 37).

D'une manière générale, les coordonnées les plus stables sont obtenues avec les contraintes fonctionnelles iso-extraites. On observe également que les écarts moyens en ordonnées obtenus sont plus faibles lorsqu'il s'agit de mouvements de doigts de la main plutôt que du visage ou du pied : la contrainte étant directement liée au mouvement de l'index, et

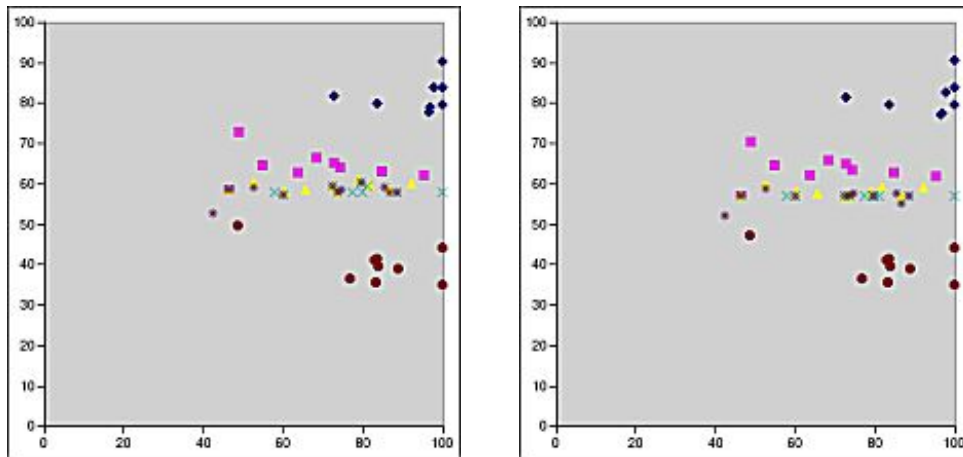


Figure 36 : repérage des foyers fonctionnels sur le gyrus précentral chez plusieurs sujets après introduction de contraintes mixtes + fonctionnelles mixtes (à gauche) ou mixtes + fonctionnelles iso-extraites (à droite)

étant donnée la répartition globale des activations motrices (figure 33), on comprend sans peine ce phénomène.

Le concept de contraintes fonctionnelles semble donc intéressant dans la mesure où il introduit des marqueurs clairement homologues d'un sujet à l'autre – par rapport aux intersections entre gyri, dont la correspondance anatomo-fonctionnelle reste, sur le plan formel, à certifier. Toutefois, la question de l'applicabilité de la technique reste ouverte : en effet, si tout examen d'I.R.M. fonctionnelle prévoit toujours une étape purement anatomique quel que soit le protocole en question, il n'existe pas de telles étapes de routine au niveau fonctionnel : l'idéal, afin de pouvoir appliquer cette méthode en toutes circonstances, serait de toujours prévoir une séance d'analyse de mouvements de base, tels que ceux considérés précédemment, de façon à toujours pouvoir utiliser ces données fonctionnelles pour renseigner le repère surfacique.

Zone du corps sollicitée	Sans contraintes	Mixtes	Iso	Mixtes + fonctionnelles mixtes	Mixtes + fonctionnelles iso
Pied	2,85	3,56	3,9	2,99	3,09
Coude	3,28	3,22	5,22	2,52	2,46
Auriculaire	3,24	2,03	2,85	0,95	0,88
Index	3,24	2,59	3,67	0,73	0
Pouce	3,5	2,42	3,11	1,21	1,09
Visage/Langue	5,08	3,07	2,9	3,47	3,16

Figure 37 : écarts moyens caractéristiques des différentes techniques de contraintes

#### 4.4. Perspectives

Les premières analyses statistiques semblent défendre le sens de cette méthode de paramétrisation de la surface corticale. On peut alors réfléchir sur certaines perspectives de recherche ouvertes au long de son élaboration. La première remarque concerne le modèle de description du gyrus introduit au paragraphe II.1. Cette approche du gyrus semble en effet refléter une philosophie bien ancrée dans les travaux menés par l'équipe du Service Hospitalier Frédéric Joliot d'Orsay : les réflexions autour des relations de voisinages entre

gyri, mieux qu'une considération analytique à base de coordonnées de points du maillage, s'apparentent à l'approche structurelle des images, défendue par l'équipe [21]. A l'heure actuelle, un fichier texte décrit les gyri de la parcellisation et indique à la méthode la façon dont diffuser les coordonnées : ne serait-il pas possible d'exhiber un seul et unique graphe de relations entre gyri dont certains arcs seraient constants (par exemple, « *gyrus précentral toujours voisin du postcentral* ») et d'autres seraient aléatoires ? De la sorte, chaque parcellisation constituerait une réalisation, une déclinaison de ce graphe, et la méthode gagnerait formellement en généralité.

Concernant la définition des contraintes paramétriques, nous avons envisagé au chapitre I d'exploiter la stabilité inter-individuelle de certains sillons au sein du gyrus : il s'est avéré que les seuls sillons répondant à cette qualité sont déjà utilisés pour constituer les frontières gyrales. Une perspective intéressante serait de réétudier cette idée lorsque la théorie des racines sulcales [12] sera capable d'identifier ces bouts de sillons atomiques au travers de la surface corticale.

Enfin, à ce stade, l'étape de validation n'a été qu'introduite : on peut légitimement projeter de la poursuivre, par exemple en éclairant davantage les étapes préalables de projections de données fonctionnelles sur les maillages, qui ont été en l'occurrence observées de manière relativement arbitraire. On pourra alors se baser sur ce repère surfacique à base de parcellisation en gyri : il constituera par exemple un point de vue supplémentaire au repère global élaboré par C. Clouchoux et al. dans le cadre d'études morphométriques et autres analyses fonctionnelles.



## Conclusion

A la suite des travaux effectués dans le cadre de ce projet, les recherches en matière de repérage du cortex cérébral peuvent légitimement voir un intérêt au travers de la parcellisation en gyri, en ce qu'elle constitue un support valable pour la paramétrisation locale de la surface corticale. On peut à ce titre rappeler l'originalité de la méthode introduite, qui se distingue de la grosse majorité des techniques de recalage de surfaces corticales existantes : les coordonnées étant distribuées à même la surface, celle-ci ne subit aucune transformation. Il s'agit là d'une approche bien différente de celle qui a fait l'histoire de la neuro-imagerie.

On aura souligné les efforts réalisés pour exhiber des marqueurs stables, dépassant l'échelle de l'individu. Néanmoins, devant la nature perfectible de la méthode de parcellisation en gyri [13,16], ces efforts se seront parfois heurtés à des cas de figures déroutants : il semble, en certaines circonstances, difficile de déterminer si certains schémas gyraux proviennent de propagations aberrantes ou s'ils constituent des cas anatomiques exceptionnels. Dans ce contexte, on peut espérer que la théorie des racines sulcales apportera bientôt des éléments de réponse. Car, d'après la conception en « boutons de coussin » de ces bouts de sillons, introduite par J. Régis [12,21], la définition du gyrus perd toute ambiguïté en devenant en toute rigueur la région comprise entre quatre racines sulcales. Il sera alors intéressant de reconsidérer la méthode de paramétrisation au travers de cette définition formelle du gyrus.

La paramétrisation de la surface corticale à partir d'une parcellisation en gyri n'en demeure pas moins un outil supplémentaire dans l'approche surfacique du cortex, capable par exemple d'appuyer les travaux de C. Clouchoux et al. [22], et dont la pertinence anatomique est défendue par les premières analyses statistiques : les analyses fonctionnelles et morphométriques qui l'exploiteront à l'avenir seront à même d'en confirmer la portée théorique.

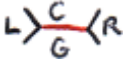
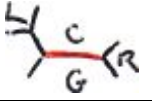
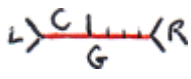
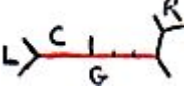
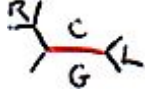
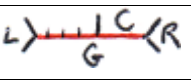
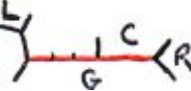
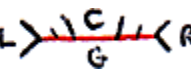

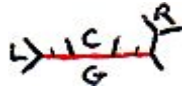
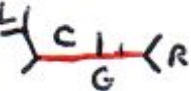
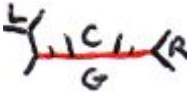
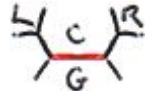
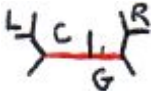
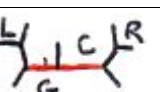
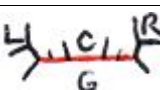


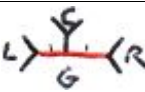
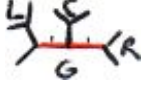
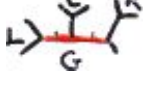
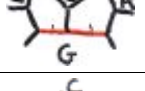


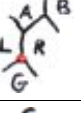

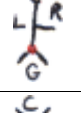
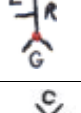
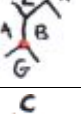
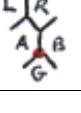
## ANNEXE A – Inventaire des schémas d'intersections reconnus

L'étude des relations de voisinages entre gyri a amené à répertorier une collection de configurations autour d'un gyrus donné, laquelle permet *in fine* d'associer au mieux tout le bord du gyrus avec le bord du domaine paramétrique.

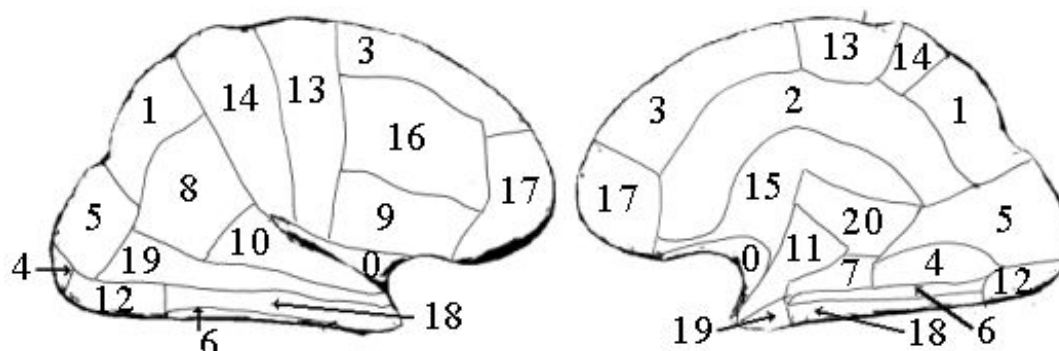
Ces différentes configurations sont diagnostiquées à partir de tests de voisinages : c'est ce que traduisent les deux tableaux suivants par les différents sigles et symboles.

Ainsi, la condition « si XYZ » fait référence à l'existence ou non d'un triangle dans le maillage, dont un sommet appartient au gyrus X, un autre au gyrus Y, et le troisième au gyrus Z, c'est-à-dire à l'existence d'une « intersection » entre ces trois gyri. De même, la condition « si AB » se rapporte à l'existence ou non sur le maillage de deux points voisins appartenant respectivement aux gyri A et B, c'est-à-dire à l'existence d'une « frontière » entre les deux gyri. La condition « si  $X \curvearrowright Y$  » quant à elle est particulière : dans le cas où les gyri X et Y ne se touchent pas, cette condition est satisfaite si ces deux gyri admettent deux et seulement deux voisins communs. De cette façon, d'un test au suivant, on parvient à détecter ces schémas d'intersection et à définir des segments, représentés en rouge dans les tableaux, homologues d'un sujet à l'autre même lorsque les motifs gyraux sont formellement différents.

Si G et C sont voisins,					
"	si GCL et GCR,				
"	si GCL et ¬GCR,	si CR,			
"	"	si GR,			
"	"	sinon :	si G } ( R,		
"	"	"	sinon :		non défini
"	si GCR et ¬GCL,	si CL,			
"	"	si GL,			
"	"	sinon :	si G } ( L,		
"	"	"	sinon :		non défini
"	si ¬GCL et ¬GCR,	si GL et GR,			
"	"	si GL et ¬GR,	si RC,		
"	"	"	sinon :	si G } ( R,	
"	"	"	"	sinon:	non défini
"	"	si GR et ¬GL,	si LC,		
"	"	"	sinon :	si G } ( L,	
"	"	"	"	sinon:	non défini
"	"	si ¬GR et ¬GL,	si LC et RC,		
"	"	"	si LC et ¬RC,	si G } ( R,	
"	"	"	"	sinon :	non défini
"	"	"	si RC et ¬LC,	si G } ( L,	
"	"	"	"	sinon :	non défini
"	"	"	si ¬LC et ¬RC,	si G } ( L et si G } ( R,	
"	"	"	"	sinon :	non défini

Si G et C ne sont pas voisins,				
"	si $G \text{---} C$ ,	si GL et GR,		
"	"	si $G \text{---} L$ et GR,		
"	"	si GL et $G \text{---} R$ ,		
"	"	si $G \text{---} L$ et $G \text{---} R$ ,		
"	sinon :	si GLR,	si RC et $\neg$ LC,	
"	"	"	si LC et $\neg$ RC,	
"	"	"	si $R \text{---} C$ et $\neg L \text{---} C$ ,	
"	"	"	si $L \text{---} C$ et $\neg R \text{---} C$ ,	
"	"	si CLR,	si LG et $\neg$ RG,	
"	"	"	si RG et $\neg$ LG,	
"	"	"	si $L \begin{matrix} A \\ \text{---} \\ B \end{matrix} G$ et $\neg R \text{---} G$ ,	
"	"	"	si $R \begin{matrix} A \\ \text{---} \\ B \end{matrix} G$ et $\neg L \text{---} G$ ,	

## ANNEXE B – Modèle de description de la parcellisation en gyri



*Légende :*

Gyrus n°1 – Gyrus pariétal  
 Gyrus n°2 – Gyrus cingulaire  
 Gyrus n°3 – Gyrus frontal supérieur  
 Gyrus n°4 – Gyrus lingual  
 Gyrus n°8 – Gyrus supramarginal  
 Gyrus n°9 – Gyrus frontal inférieur  
 Gyrus n°10 – Gyrus temporal supérieur

Gyrus n°12 – Gyrus occipital  
 Gyrus n°13 – Gyrus précentral  
 Gyrus n°14 – Gyrus postcentral  
 Gyrus n°16 – Gyrus frontal moyen  
 Gyrus n°17 – Gyrus orbital  
 Gyrus n°18 – Gyrus temporal inférieur  
 Gyrus n°19 – Gyrus temporal moyen

La région étiquetée par le numéro 0 est identifiée comme étant l'insula ; elle n'est pas considérée comme un gyrus.

Le bord « haut » ou « bas » d'un gyrus est défini à partir des intersections qu'il fait (éventuellement) avec les gyri qu'on lui donne ci-dessous pour voisins. L'annexe A répertorie les configurations gyrales pour lesquelles on définit ce bord.

Gyrus	Délimité en haut par	Délimité en bas par
n°1	Lingual / Cingulaire / Postcentral	Lingual / Supramarginal / Postcentral
n°2	Gyrus n°11 / Orbital / Frontal supérieur	Gyrus n°15 / Pariétal / Postcentral
n°3	Orbital / Cingulaire / Précentral	Orbital / Frontal moyen / Précentral
n°4	Occipital / Pariétal / Cingulaire	Occipital / Gyrus n°6 / Gyrus n°11
n°5	Supramarginal / Pariétal / Cingulaire	Occipital / Lingual / Cingulaire
n°6	Occipital / Lingual / Gyrus n°11	Occipital / Temporal inférieur / Gyrus n°11
n°7	Lingual / Pariétal / Temporal moyen	Lingual / Gyrus n°6 / Gyrus n°11
n°8	Postcentral / Pariétal / Temporal moyen	Postcentral / Temporal supérieur / Temporal moyen
n°9	Orbital / Frontal moyen / Précentral	Orbital / Insula / Précentral
n°10	Postcentral / Supramarginal / Temporal moyen	Insula / Gyrus n°11 / Temporal moyen
n°11	Gyrus n°7 / Gyrus n°15 / Cingulaire	Temporal supérieur / Insula / Orbital
n°12	Temporal inférieur / Supramarginal / Lingual	Temporal inférieur / Gyrus n°6 / Lingual
n°13	Frontal supérieur / Cingulaire / Postcentral	Frontal inférieur / Insula / Postcentral
n°14	Précentral / Cingulaire / Pariétal	Précentral / Insula / Temporal supérieur
n°15	Cingulaire / Pariétal / Lingual	Gyrus n°11 / Orbital / Cingulaire
n°16	Orbital / Frontal supérieur / Précentral	Orbital / Frontal inférieur / Précentral
n°17	Cingulaire / Frontal supérieur / Frontal moyen	Gyrus n°11 / Insula / Frontal inférieur
n°18	Temporal moyen / Occipital / Gyrus n°6	Gyrus n°6 / Temporal supérieur / Temporal moyen
n°19	Temporal supérieur / Supramarginal / Occipital	Temporal supérieur / Gyrus n°11 / Temporal inférieur

## Bibliographie :

- [1] J. Talairach and J. Tournoux, *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*, Thieme Medical, New York, 1988
- [2] M. S. Gazzaniga, R. B. Ivry and G. R. Mangun, *Cognitive Neuroscience, The Biology of the Mind*, pp 44-50, 1998
- [3] K. Brodmann and K. Vergleichende, *Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues*, 1909
- [4] S. Ogawa, T.M. Lee, A.R. Kay, and D.W. Tank, *Brain Magnetic Resonance Imaging with Contrast Dependent on Blood Oxygenation*, 1995
- [5] B. Fischl, M.I. Sereno, R. Tootell, and A.M. Dale, *Cortical surface-based analysis, ii: Inflation, attening, and a surface-based coordinate system*, *NeuroImage*, 9:195-207, 1999
- [6] H. Drury, D.C. Van Essen, M. Cerbetta, A. Snyder, *Surface-based analyses of the human cerebral cortex*, in : Toga A. (ed) : *Brain warping*. New York : Academic Press, 1998
- [7] D.C. Van Essen and H.A. Drury, *Structural and functional analyses of human cerebral cortex using a surfacebased atlas*, *J Neurosci*, 17(18), 7079-7102, 1997
- [8] D.C. Van Essen, J.W. Lewis, H.A. Drury, N. Hadjikhani, R.B.H. Tootell, M. Bakircioglu, M.I. Miller, *Mapping visual cortex in monkeys and humans using surface-based atlases*, *Vision Research*, 41:1359–1378, 2001
- [9] D.C. Van Essen, H.A. Drury, S. Joshi, and M.I. Miller, *Functional and structural mapping of human cerebral cortex: solutions are in the surfaces*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95(3), 788-795, 1998
- [10] R. Toro and Y. Burnod, *Geometric atlas: modeling the cortex as an organized surface*, *Neuroimage*, 20(3):1468-1484, 2003
- [11] C. Clouchoux, O. Coulon, A. Cachia, D. Rivière, J.F. Mangin, and J. Régis, *Towards an anatomically meaningful parameterization of the cortical surface*, *MICCAI 2004: 7th International Conference*, vol. 3217, pp. 1046-1047, 2004
- [12] J. Regis, J.-F. Mangin, T. Ochiai, V. Frouin, D. Riviere, A. Cachia, L. Do, and Y. Samson, *The sulcal roots generic model: a hypothesis to overcome the variability of the human cortex folding patterns*, Submitted, 2004
- [13] A. Cachia, *Modèles statistiques morphométriques et structurels du cortex pour l'étude du développement cérébral*, Thèse de Doctorat, 2003
- [14] C. Brechbuhler, G. Gerig, and O. Kobler, *Parameterization of closed surfaces for 3d shape description*, *Computer Vision and Image Understanding*, 61:154-170, 1995
- [15] A. van der Kouwe, C. Destrieux, E. Halgren, F. Ségonne, D.H. Salat, E. Busa, L.J. Seidman, J. Goldstein, D. Kennedy, V. Caviness, N. Makris, B. Rosen and A.M. Dale, *Automatic Parcellating the Human Cerebral Cortex*, *Cerebral Cortex*, 14:11-22, 2004
- [16] A. Cachia, J.F. Mangin, D. Rivière, D. Papadopoulos-Orfanos, F. Kherif, I. Bloch, and J. Régis, *A generic framework for parcellation of the cortical surface into gyri using geodesic Voronoï diagrams*, *Medical Image Analysis*, 2003
- [17] D. Rivière, J.-F. Mangin, D. Papadopoulos-Orfanos, J.-M. Martinez, V. Frouin, and J. Régis, *Automatic recognition of cortical sulci of the human brain using a congregation of neural networks*, *Medical Image Analysis*, 6(2):77-92, 2002
- [18] C. Clouchoux, *Recalage de surfaces corticales - Vers un système de coordonnées surfaciques*, Mémoire de DEA, DEA MCAO, LSIS, 2004



- [19] M. Chung, J. Taylor, K. Worsley, J.O. Ramsay, S. Robbins, and A. Evans, *Diffusion smoothing on the cortical surface via the Laplace-beltrami operator*, IEEE Transaction on Medical Imaging, submitted.
- [20] W. Penfield, T. Rasmussen, *Secondary sensory and motor representation*, The cerebral cortex of man, pp 109-134 New York: Macmillan, 1950.
- [21] J-F. Mangin, D. Rivière, O. Coulon, C. Poupon, A. Cachia, Y. Cointepas, J.-B. Poline, D. Le Bihan, J. Régis, D. Papadopoulos-Orfanos, *Coordinate based versus structural approaches to brain image analysis*, Artificial Intelligence in Medicine, 30:177--197, 2004.
- [22] C. Clouchoux, O. Coulon, D. Rivière, A. Cachia, J.-F. Mangin and J. Régis, *Anatomically constrained surface parameterization for cortical localization*, MICCAI'05, International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, Palm Spring, California, USA, 2005.