

# Analyse collaborative multi-critères : Application aux signaux électrophysiologiques intracérébraux

M. NDIAYE<sup>1</sup>, J. J. MONTOIS<sup>1</sup>, A. KINIE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image, INSERM U642 antenne de Saint Malo, IUT de Saint Malo, 35409, France  
{mamadou.ndiaye, jean-jacques.montois, abel.kinie}@univ-rennes1.fr

**Résumé** — Ce travail s'inscrit dans le contexte de l'analyse et de l'interprétation des signaux électrophysiologiques intra cérébraux enregistrés chez des patients épileptiques, mais également dans une recherche méthodologique visant à exploiter les propriétés de l'agent dans les systèmes complexes. L'objectif est d'expérimenter l'apport de ces techniques dans l'amélioration de l'extraction, la représentation, l'interprétation des informations et la mise en œuvre de stratégies de contrôle dans les différents traitements. Notre approche exploite l'ensemble des informations enregistrées lors de l'exploration intracérébrale (Stéréo-ElectroEncéphaloGraphie) et sélectionne dynamiquement celles d'intérêts pour optimiser les traitements sans tronquer l'information. La méthode associe des algorithmes de traitement du signal (analyse spectrale, mesure de causalités entre signaux) approuvés dans l'analyse du signal épileptique dans un système multi-agent.

**Abstract** — This work is focused on the study and interpretation of *epileptic signals*, based on the analysis of stereoelectroencephalographic (SEEG) signals with signal processing method and multi-agent approach. The objective is to experiment this technical contribution in information extraction, representation and interpretation as well as the implemented control strategies in the various processes. Our approach deal with the information recorded during the intracerebral exploration and it exploits a dynamical selection of the interest's information to optimize processes without truncating the information. We associated signal processing algorithms (spectrum analysis, causality measure between signals) approved in the analysis of the epileptic signal in a multi-agent system.

## 1. Introduction

En Stéréo-ElectroEncéphaloGraphie (SEEG), on dispose de signaux électrophysiologiques riches en informations sur les objets observés. Ces signaux renseignent différentes facettes du fonctionnement d'une entité structurelle, d'un organe ou encore d'un système. Les structures cérébrales participent de manière conjointe ou hiérarchique et de façon reproductible à des tâches cognitives ou à des processus pathologiques. Certaines dynamiques locales résultent d'une action conjointe de structures distinctes. Les crises d'épilepsies prennent naissance dans une région du cerveau très localisée et se propagent de manière diffuse vers d'autres structures cérébrales [1]. Ceci étant, il est admis que les décharges critiques n'ont pas de propagation simple, linéaire, qui pourraient être définies a priori par un seul critère; elles sont multidirectionnelles et se propagent suivant une succession de décharges critiques. Il s'agit d'un système multidimensionnel, multi-variable, fragmenté en une multitude d'entités neurales indépendantes en mutuelles influences. Ces différentes remarques nous mettent face à la résolution d'un problème complexe naturellement distribuée. Les méthodes de traitement du signal proposent aujourd'hui des approches et des éléments de réponse conduisant à mieux définir les concepts complexes de zone épileptogènes [2]. Les concepts de topographie (« où est la source du signal ? ») et de synchronie (« ces deux signaux sont-ils synchrones, donc reflétant une connectivité fonctionnelle ? ») sont maintenant clairement définis [2]. Cependant les éléments de réponse apportés par ces méthodes s'appuient souvent sur un seul critère et reposent sur une série de traitements et de corrélations appliqués à un petit nombre de signaux (sélectionnés visuellement parfois) parmi le grand nombre de signaux enregistrés (100 voies en moyenne par exploration).

Nous présentons dans ce papier une approche qui associe différentes méthodes de traitement du signal dans une architecture distribuée collaborative. Cette approche, basée sur un système multi-agent (SMA) [3][4], intègre différents critères (similarité, relations statistiques et synchronisation) pour faire face à la problématique d'analyse et d'interprétation des signaux (non-stationnarité, non-linéarité, problème combinatoire, absence de méthode globales).

La deuxième partie de ce papier (§2) expose la transposition de ce problème de traitement vectoriel dans un espace multi-agents. Le troisième point explicite les différentes phases de la méthodologie. Les résultats expérimentaux sont présentés dans le quatrième point et la dernière partie propose une discussion des bénéfices attendus de cette nouvelle approche dans l'analyse des signaux SEEG.

## 2. Agentification du problème

L'approche proposée transpose ce problème de traitement vectoriel dans un espace agent où les entités du système coopèrent [5] pour résoudre le problème combinatoire induit par les mises en relations entre les différentes structures cérébrales. Ceci conduit, grâce à un ordonnancement pertinent des algorithmes de traitement du signal, à l'émergence des mises en jeu coordonnées de ces structures. Nous partons de l'idée que l'on a affaire à un ensemble de groupes neuronaux pouvant présenter, sur une fenêtre temporelle donnée, des activités paroxystiques de différents types et des interactions plus ou moins prononcées induisant les comportements de ces groupes. Le problème posé consiste à corroborer ces hypothèses et surtout à les mettre en évidence sur la base d'un signal vectoriel  $S(t) = [S_1(t) \dots S_M(t)]$  observé sur un intervalle  $[0, T]$ . Autrement dit, il consiste : (i) à caractériser chacune des voies  $S_i(t)$ , (ii) à déterminer les relations (statistiques, similarités, synchronisation) entre les

différentes voies  $S_i(t)$ , (iii) à étudier l'organisation d'ensemble à partir de l'analyse des signaux  $S_i(t)$ , et (iv) à relier à la notion de couplage fonctionnel entre structures aux quantités fournies par les méthodes de traitement du signal encadrées par le SMA dédié. Nous distinguons 3 types d'agents dans notre architecture.

- Un agent signal ( $A_{S_i}$ ) qui s'associe à chaque signal  $S_i(t)$  (figure 1), il évolue dans un environnement où existent d'autres agents signaux. Il agit sur lui-même (pour extraire ses propriétés), communique avec les autres agents (pour définir ses actions). Ses principaux attributs sont la réactivité, l'adaptabilité, la continuité temporelle, la confiance et la négociation.
- Un agent "Structure" ( $S_{P_i}$ ) qui s'associe à chaque région cérébrale regroupant plusieurs agents signaux (figure 2). Il supervise les agents de sa région, sélectionne les meilleurs représentants par région. Il est doté d'attributs cognitifs, de continuité temporelle, d'arbitrage.
- Des agents de contrôle : l'agent gestionnaire du système ( $G_0$ ) qui fait le lien entre l'utilisateur et le SMA, l'agent "Serveur" ( $B_s$ ) qui gère la base de données des agents signaux et l'agent "Observateur" ( $O_s$ ) qui joue le rôle de superviseur global contrôlant les processus.

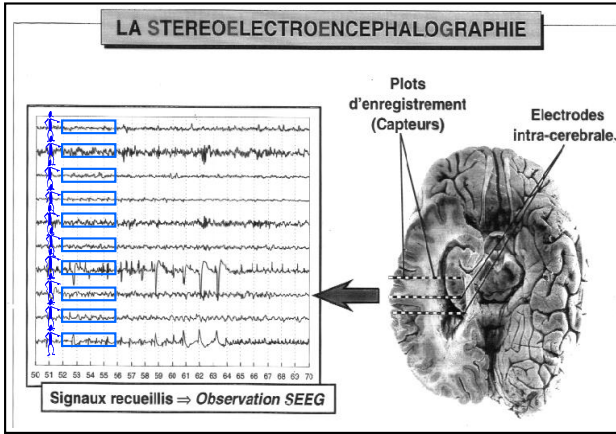


Fig. 1. Analyse vectorielle des signaux épileptiques. Les agents agissent localement au niveau micro grâce au réseau d'agents situés pour faire émerger des phénomènes globaux au niveau macro.

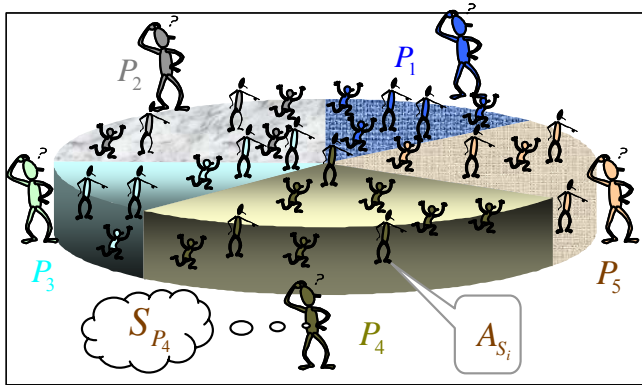


Fig. 2. Les agents signaux sont partitionnés en groupes d'agents appartenant à la même structure cérébrale (en fonction de leur localisation spatiale : électrode & profondeur du plot) et un agent structure est associé à chaque partition.

### 3. Méthodologie

La méthode doit faire face à un problème de décision, d'organisation et d'ordonnancement d'un grand nombre de signaux SEEG dans les processus épileptiques. Les agents, représentants de ces signaux, répondent partiellement à la résolution de ce problème combinatoire, ils sont autonomes, ont une vision locale de l'environnement et collaborent collectivement pour faire émerger le but du système [6]. L'objectif global est de faire émerger la dynamique des structures similaires et celles qui sont synchronisées tout en minimisant le nombre d'opérations à effectuer.

La plateforme proposée doit identifier automatiquement les structures impliquées dans les processus épileptiques et étudier les relations entre ces structures au travers de la communauté d'agents. C'est pourquoi des agents situés, associés aux données (signaux) sont suivis et supervisés localement par des agents spécialistes (agents structures). Des agents de contrôle complètent le système pour des besoins de contrôle. L'intelligence collective, les mécanismes de contrôle, de coordination et les algorithmes de traitement sont spatialement distribués dans les différentes composantes du système. Chaque structure (ou signal SEEG) est associée à un agent, à l'intérieur duquel sont mis en œuvre des processus locaux de traitement ("agents signaux") et d'interprétation ("agents structures"). L'interaction algorithmique signal et SMA est déclinée en 4 phases conjointement exécutées :

- 1) Extraction quantitative d'informations.
- 2) Sélection des agents signaux d'intérêt.
- 3) Caractérisation des connectivités entre structures.
- 4) Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle.

#### 3.1 Extraction quantitative d'informations

L'extraction quantitative d'informations caractérise chaque agent signal par des propriétés intrinsèques qui définissent ses indicateurs d'évolution. Ces derniers sont constitués d'un indicateur scalaire  $C_s$  qui code la répartition de l'énergie dans différentes bandes de fréquences  $\epsilon_k$  ( $k = 0, 1, \dots, 8$ ) classiquement utilisée en épilepsie et un vecteur caractéristique  $\Gamma_s$  composé de l'énergie dans chaque bande (voir équations 1 et 2). Les propriétés individuelles définissent l'état de l'agent signal (actif ou inactif) en fonction des variations de  $C_s$  et  $\Gamma_s$  dans l'espace temporel. L'extraction quantitative d'information concerne aussi la caractérisation des propriétés collectives (liens inter-agents). Il s'agit des mesures de relations (coefficient d'inter corrélation non linéaire [7]), de similarités (distance euclidienne des  $\Gamma_s$ ) et de synchronisations (temporelle des variations de  $\Gamma_s$ ) entre agents qui permettent de suivre la dynamique des connectivités entre signaux. Le problème combinatoire limite cette extraction d'informations à tous les agents d'où la nécessité de recourir à des stratégies de sélection des agents d'intérêts. Chaque agent signal dispose d'une variable "tempsInitialActivation" qui repère le début de son activation, ce temps reste invariable tant que l'agent signal reste actif, il est mis à zéro lorsque l'agent passe à un état inactif et prend le temps courant si l'agent redevient actif.

$$\Gamma_{s_i}(E_{i\epsilon_0}, E_{i\epsilon_1}, \dots, E_{i\epsilon_8}) \text{ où } E_{i\epsilon_k} = \frac{e_{i\epsilon_k}}{e_{i\epsilon_T}} \quad (0 \leq E_{i\epsilon_k} \leq 1) \quad (1)$$

$e_{i\epsilon_k}$  = énergie dans  $\epsilon_k$  et  $e_{i\epsilon_T}$  = énergie totale du signal.

$$C_{s_i} = 2^0 \times E_{i\epsilon_0} + 2^1 \times E_{i\epsilon_1} + \dots + 2^8 \times E_{i\epsilon_8} \quad (2)$$

### 3.2 Sélection des agents signaux d'intérêts

Le SMA limite la charge de travail instantanée du système en minimisant les traitements redondants et en assurant une meilleure répartition de la charge. Pour cela, il sélectionne à chaque instant, la quantité minimum de données à exploiter pour approcher au mieux les résultats qui exploiteraient l'ensemble des données. Le critère de sélection est basé sur la redondance des informations contenues dans les différentes structures explorées. Cette sélection résulte de trois comportements de l'agent signal *réunion-diffusion-décimation* [8]. L'agent signal se regroupe par critère de similarité avec ses voisins les plus proches. Il étend son groupe par diffusion de ses informations locales aux membres de sa partition. Chaque groupe d'agents similaires d'une partition donnée est représenté par un unique agent choisi en fonction de priorités préétablies suivant cet ordre : le "tempsInitialActivation", puis suivant le  $C_s$  et enfin suivant l'énergie totale  $e_{i\epsilon_T}$ . Ces mécanismes de sélection s'appliquent dans des contextes locaux et à dans des instants où le nombre d'agents signaux actifs d'une localisation donnée dépassent un seuil fixé expérimentalement. Ce choix pratique doit garantir un bon compromis entre la qualité des résultats et le temps de calcul.

### 3.3 Caractérisation des liens entre structures

Les liens entre agents signaux appartenant à des structures différentes sont matérialisés par les méthodes d'extractions de propriétés collectives qui sont : les mesures de *similarité*, les mesures de *relations statistiques* et les mesures de *synchronisations* entre agents. Les deux premiers critères sont quantifiés par les représentants de groupes d'agents signaux homogènes. Chaque agent leader de groupe se prononce sur ses liens avec les autres agents élus et ces liens engagent tous les membres du groupe grâce à une relation de confiance des agents pour leur leader. Le troisième critère s'appuie sur une synchronisation temporelle (au niveau global) entre les modifications locales observées sur chaque *agent signal*. Une recherche locale de modifications des propriétés individuelles est effectuée. En cas de détection d'importantes modifications entre deux instants successifs (écart de plus de 20% entre deux composantes de même rang des vecteurs  $\Gamma_s$  et  $\Gamma_s(t-\delta t)$  ou lorsque la distance euclidienne entre  $\Gamma_s(t)$  et  $\Gamma_s(t-\delta t)$  est supérieure à 50%, l'agent signal déclenche par envoi de message (sous forme d'une alerte) au superviseur global ("agent Observateur"). La synchronisation des alertes permet de matérialiser les liens de synchronisation entre les différentes structures cérébrales.

### 3.4 Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle

Il s'agit dans cette propriété de donner une interprétation basée sur les modifications locales des connectivités entre structures. Chaque agent structure se prononce (à travers ses leaders) sur ses liens avec les autres structures à chaque instant. La combinaison de toutes les propositions produit un graphe au niveau global. Ce graphe suit la dynamique spatio-temporelle de la crise analysée. L'observation des modifications entre graphes successifs par l'évaluation des distances entre ces derniers permet de matérialiser la dynamique des modifications organisationnelles.

## 4. Résultats

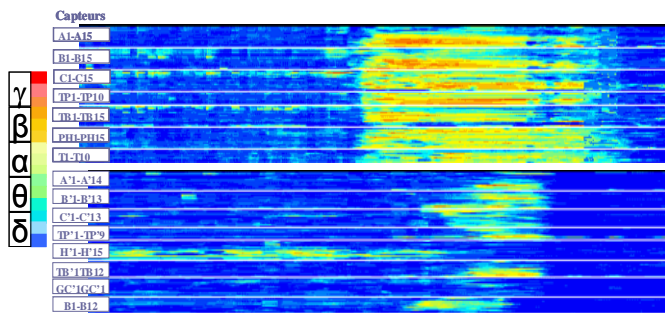
Les données utilisées dans cette étude proviennent de 4 patients (P1 à P4) souffrant d'une épilepsie du lobe temporal (crises partielles) et candidats à un traitement chirurgical. Une centaine de signaux SEEG est traité en moyenne pour chaque patient. Le système produit pour chaque patient une nappe spatio-temporo-spectrale colorée et des graphes qui symbolisent la dynamique des connectivités entre structures.

Lorsque le processus d'analyse parcourt la crise sur le plan temporel, l'agent "Observateur" élabore une représentation de la crise sous forme de nappe spatio-temporo-spectrale colorée. La figure 3 illustre ces nappes pour les patients P1 et P2. Les différentes zones impliquées dans les processus pathologiques y sont clairement localisées par leur capteur et identifiées par leur classe  $C_s$  et en fin une analyse globale de la crise peut y être observée. La sélection a permis de contrôler et d'optimiser les différentes opérations et de faire converger le système vers les objectifs visés (une meilleure gestion de l'aspect combinatoire). Chaque agent signal agit localement pour extraire ses propriétés intrinsèques (*perception*) qui définit son état (*décisions*) qui détermine ses futures *actions*. En effet l'état d'activation de l'agent lui permet de rentrer en compétition pour représenter ses affinités (les membres de son groupe). Ce statut de leader lui donne le privilège de caractériser les liens du groupe avec les autres groupes. En fonction du nombre d'agents actifs qui quantifie la charge de travail instantanée du système, le SMA peut déclencher les processus de sélection des agents d'intérêts parmi les agents actifs. Lorsque le superviseur local (agent structure) détecte l'activation de plusieurs agents dans sa localité, il véhicule l'information vers les agents signaux et ceci entraîne le déclenchement des processus locaux de sélection.

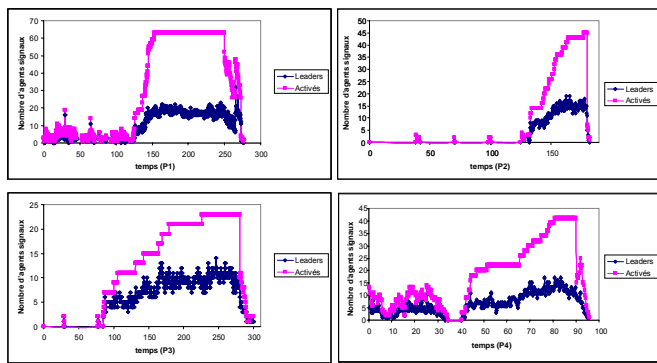
L'analyse de la charge de travail instantanée du système (figure 4) durant les fortes combinatoires montre que parmi les 89 agents signaux associés à l'enregistrement de la crise du patient P1, au maximum près de 73% (65 agents) sont activés en même temps sur une longue période et seuls 38% (au maximum) de ces agents activés (25 agents) effectuent les traitements opératoires pour le compte de leur groupe. Pour le patient P2, au maximum moins de la moitié (45 agents) parmi les 95 agents signaux associés, sont activés en même temps et au plus la moitié des agents activés (20 agents) sont élus. Tandis que 60% des agents activés (14 agents) sur les 96 sont leaders pour le patient P3. Pour le patient P4, au maximum la moitié des agents situés (43 agents) sont activés en même temps et la moitié de ceux-ci (18 agents) sont sélectionnés.

Les structures impliquées dans les processus épileptiques se réorganisent suivant les différentes phases de la propagation des activités critiques. Cette réorganisation est décrite par la dynamique spatio-temporelle des synchronisations entre structures. Elle est clairement établie par un parcours des différents graphes du système (figure 5). Les graphes produits par le système décrivent précisément l'organisation du réseau de structures cérébrales qui coopèrent dans l'initiation, dans les phases de propagation et de diffusion des crises. La mesure des distances euclidiennes entre graphes successifs permet de quantifier et de caractériser la dynamique des modifications organisationnelles (figure 6). La figure 6 met en évidence les différents instants de modifications organisationnelles. Des graphes très proches durant les phases intercritiques, symbolisées par de faibles distances entre

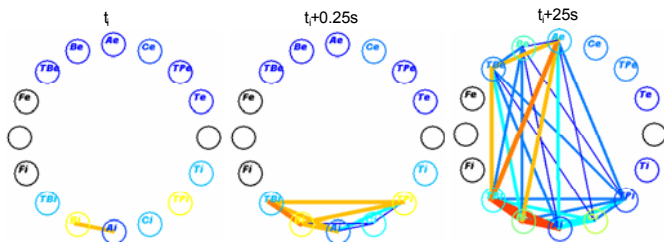
graphes successifs sont observés. Des dissemblances remarquables aux instants de transitions entre les différentes phases sont également notées et enfin des oscillations plus ou moins stables durant chaque phase.



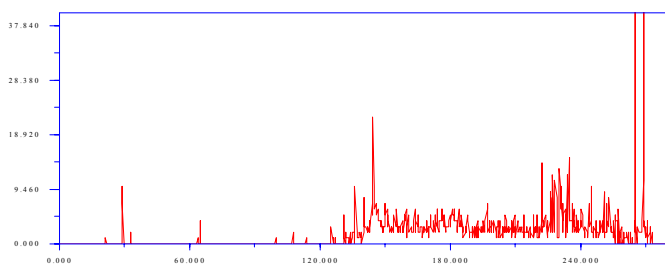
**Fig. 3.** Nappes spatio-temporo-spectrale colorées de P1 (au dessus) et P2 (en dessous). Elles offrent une vision d'ensemble de la crise analysée. Les couleurs "froides" et "chaudes", variant du bleu au rouge, codent respectivement les activités "basse fréquence" et "haute fréquence". Les plots des électrodes sont numérotés de 1 à 15 depuis l'extrémité interne jusqu'à l'extrémité externe.



**Fig. 4.** Dynamique de la charge instantanée du système. Elle s'exprime en terme de nombre d'agents signaux actifs et de ceux qui sont privilégiés (leaders) à effectuer les traitements.



**Fig. 5.** Graphes des couplages entre structures. Les agents structures sont les nœuds et les liens entre agents signaux symbolisent les arcs. Les degrés des liaisons sont codés par une couleur variant du bleu au rouge d'intensité variable en fonction de la force des liens.



**Fig. 6.** Dynamique des distances entre graphes successifs produit par le système pour le patient P1.

## 5 Conclusion et Perspectives

Une méthode d'analyse descriptive, quantitative, globale et automatique de l'organisation des événements paroxystiques critiques a été proposée et appliquée à l'ensemble des signaux vectoriels enregistrés lors de l'investigation pré-chirurgicale.

Sur le plan méthodologique, la structuration par agents a permis d'organiser, de contrôler les différents traitements, d'assurer leur coordination en intégrant au mieux les spécificités de chacun afin de faire émerger toutes les combinaisons d'intérêts entre régions cérébrales. Cette démarche qui nous démarque des travaux antérieurs en épilepsie se décline en 4 phases ; présentées ci-dessus. Elle met en place des stratégies de contrôle sur les agents pour organiser, ordonnancer et interpréter la quantité d'informations extraites des signaux.

Sur le plan clinique, la structuration par agents a permis d'identifier différentes activités contenues dans les signaux SEEG analysés et d'observer l'évolution de ces activités cérébrales durant la crise. L'analyse de cette dynamique a permis de dégager des nappes et des graphes de couplages statistiques entre groupes de signaux permettant également de suivre l'ordonnancement des activités épileptiques (mise en évidence par la dynamique des groupes en "coopération"). La plateforme développée, peut apparaître comme une alternative à la difficulté de « lire » dans les données, les liens entre les structures cérébrales, en produisant des graphes capables de renseigner sur les structures cérébrales qui coopèrent durant les crises. Et être ainsi un outil efficace d'aide au diagnostic pour le clinicien.

Les perspectives de ce travail portent sur une exploitation plus importante des potentialités de l'approche "multi-agent" en intégrant d'avantage d'informations a priori sur l'anatomie cérébrale, les structures d'intérêts. Il serait aussi intéressant de mettre plus d'interactifs entre le système et son utilisateur.

## Références

- [1] J. Bancaud, "Stereoencephalography. In: Remond A, editor. Handbook of electroencephalography and clinical neurophysiology", vol 10, Amsterdam: Elsevier; pp. 3-65, 1975.
- [2] J Gotman "L'analyse de l'EEG de Berger à nos jours", in Epileptic Disorders Vol 3, Numéro 3, pp. 7-10, 2001.
- [3] J. Ferber, "Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence" Addison Wesley London, 1999.
- [4] G. Weiss, "Multiagent System. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts (Ed) 1999.
- [5] C. Garbay, "Architectures logicielles et contrôle dans les systèmes de vision. Chapitre du Livre "Les systèmes de visions", hermes Paris, 2001 pp. 197-251.
- [6] E. Altman, T. Başar, R. Srikant, "Nash equilibria for combined flow control and routing in networks : Asymptotic behaviour for a large number of users", IEEE Transactions on Automatic Control, Special Issue on Control Issues in Telecommunication Networks, Vol.6, #47, pp. 917-930, 2002
- [7] F. Bartolomei, P. Chauvel, F. Wendling "Dynamique des réseaux neuraux dans les épilepsies partielles humaines," Revue Neurologique, Vol 161, pp. 767-780, 2005.
- [8] E. Duchesnay, J.J. Montois, Y. Jacquelet, "Cooperative Agents Society Organized as Irregular Pyramid : A mammography segmentation application", Vol. 24, n°14, pp. 2435-2445, 2003.