

# Contrôle intelligent dans le traitement vectoriel des signaux épileptiques: approche expérimentale multi-agents

Intelligent control in vectorial analysis of epileptic signals:  
a multi-agents experimental approach

**Mamadou Ndiaye<sup>1,2</sup>, Jean-Jacques Montois<sup>1,2</sup> et Abel Kinié<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Inserm, U642, Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image, Rennes, F-35000, France

<sup>2</sup>Université de Rennes 1, LTSI, Rennes, F-35000, France

LTSI, IUT de Saint-Malo, rue de la Croix Désilles, BP 195, 35409 Saint-Malo CEDEX  
mamadou.ndiaye@univ-rennes1.fr, jean-jacques.montois@univ-rennes1.fr, abel.kinie@univ-rennes1.fr

Manuscrit reçu le 27 septembre 2006

## Résumé et mots clés

Ce travail s'inscrit dans le contexte de l'analyse et de l'interprétation des signaux électrophysiologiques intracérébraux enregistrés chez des patients épileptiques, mais également dans une recherche méthodologique visant à exploiter des agents coopératifs dans cette analyse complexe. L'objectif est d'exploiter l'apport de ces techniques dans l'amélioration de l'extraction, la représentation et l'interprétation des informations mais surtout la mise en œuvre de stratégie 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'intérêt pour optimiser les traitements sans tronquer l'information. L'approche associe des algorithmes de traitement du signal (analyse spectrale, mesure de causalité entre signaux) éprouvés dans l'analyse du signal épileptique dans un système multi-agents. La méthode a mis en évidence la dynamique temporelle et l'organisation des réseaux des structures cérébrales qui coopèrent dans les différentes phases des crises d'épilepsie.

**Epilepsie, Traitement du Signal, Représentations des Signaux Biomédical, Système Multi-Agent, Intelligence Artificielle Distribuée, Approche Comportementale.**

## Abstract and key words

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. We apply this architecture to identify the pathological cerebral structure and to analyse the dynamics of cerebral regions involved in epileptic seizure recorded on patients suffering from partial epilepsy.

Epilepsy, Signal Processing, Biomedical Signal Processing, Multi-Agent System, Distributed Artificial Intelligence, Behaviour Approach

# 1. Introduction

Les crises d'épilepsie sont caractérisées par des décharges paroxystiques initiées par un réseau (réseau épileptogène) distribué dans différentes structures cérébrales liées par des connexions dynamiques et anormalement facilitées [1]. L'identification de ce réseau, chez un patient donné, conduit à la définition d'un geste chirurgical optimal, c'est-à-dire limitant la taille de la résection de la région d'origine des crises à la plus réduite possible [2] [3]. Les décharges paroxystiques sont multidirectionnelles, elles peuvent *emprunter plusieurs voies de propagation* et peuvent déclencher l'*excitation de structures secondaires*. Les fonctions cognitives sont associées à la *mise en jeu coordonnée de plusieurs régions cérébrales* intégrant à la fois des *phénomènes locaux et globaux*. Si les méthodes de traitement du signal proposent aujourd'hui des approches conduisant à mieux définir les concepts complexes de *zones irritative et épileptogène* [4] [5] ainsi que ceux de *topographie* (où est la source du signal ?) et de *synchronie* (*ces deux signaux sont-ils synchrones, donc reflétant une connectivité fonctionnelle ?*) [5] [6], les éléments de réponse apportés s'attachent souvent à ne quantifier qu'une partie des informations contenues dans ces signaux. Ces méthodes s'appuient généralement sur une approche descendante et rendent difficilement compte de la dynamique des interactions entre structures cérébrales impliquées dans les processus épileptiques. Le problème de l'analyse de la propagation de l'activité épileptique est difficile à solutionner avec ces approches car le système doit faire face à des situations variables et imprévisibles (crises d'épilepsie). Ce problème est abordé ici par un système distribué coopératif [7] et [8]. La première génération des systèmes distribués apparaît au milieu des années 1970 avec le développement de l'intelligence artificielle distribuée (IAD). Cette génération est caractérisée par une distribution des connaissances et des traitements tout en conservant un contrôle centralisé. Les plus importantes contributions furent celles d'Erman et Roth Hayes [9] avec Hearsay II, un système de reconnaissance de la parole, celles de Lesser [10] et d'Acteurs de Hewitt [11]. Les systèmes de deuxième génération, apparus aux années 1990, apportent la décentralisation du contrôle, la réutilisabilité et les agents autonomes coopératifs [7], [12] et [8]. Le système distribué coopératif repose sur un formalisme agent qui vise à organiser et contrôler les traitements, à assurer leur coordination en intégrant au mieux les spécificités de chaque traitement afin de faire émerger les combinaisons d'intérêt entre régions cérébrales explorées. On espère ainsi grâce à l'analyse par agent, une meilleure adaptabilité aux changements erratiques du signal et une gestion efficace de la complexité (par approche locale). C'est alors le contrôle [13] et le suivi de l'évolution des activités des agents qui vont rendre compte de l'évolution des activités des structures cérébrales explorées. Le paragraphe deux explicite le cadre formel de l'étude envisagée. Il pose le problème traité en 2.2.1 et le transpose dans un espace agent en 2.2.2. La démarche métho-

dologique entreprise est alors exposée en détails dans la troisième partie qui présente la plateforme expérimentale du système multi-agents (SMA) dédié à l'analyse des signaux SEEG. Le quatrième paragraphe discute des résultats expérimentaux obtenus et les compare à l'analyse clinique traditionnelle faite par le clinicien et la dernière partie propose une discussion des bénéfices attendus de cette approche originale dans l'analyse des signaux SEEG et élargit le questionnement sur le monitoring des patients épileptiques.

## 2. Cadre formel de l'étude

Ce paragraphe pose le problème traité dans un contexte plus général de l'analyse de la propagation de l'activité épileptique, il transpose ensuite ce problème de traitement vectoriel des signaux SEEG en une approche coopérative organisée par un SMA dédié. Le problème doit pouvoir être mieux pris en compte par l'association d'une approche locale et d'une vision globale intégrant la coopération entre les structures cérébrales mises en jeu. L'analyse, le contrôle et le suivi de l'évolution de ces structures nécessitent une analyse dynamique, automatique, vectorielle et globale de tous les signaux enregistrés durant les crises. Cette approche d'analyse globale devrait entraîner une caractérisation mieux ciblée des événements paroxystiques. Car leur organisation se manifeste dans les signaux de profondeur par des dynamiques spatio-temporelles brèves et reproductibles formées de plusieurs structures cérébrales interconnectées et distribuées dans le cerveau. Une analyse vectorielle et située, basée sur une approche combinée (traitement du signal et SMA), des signaux épileptiques, sur toutes les voies enregistrées lors de l'exploration pré-chirurgicale est proposée pour décrire l'organisation spatio-temporelle des crises.

### 2.1. Position du problème

Les crises d'épilepsie sont caractérisées par des connexions qui s'organisent et se réorganisent sous forme des groupes de structure cérébrale en très forte communication [Bancaud]. Ces organisations évoluent, apparaissent, se renforcent, s'affaiblissent et disparaissent. Étudier l'ensemble de ces influences, les localiser, les quantifier et les mettre en relation pose ici la question de la résolution d'un problème très complexe et de nature distribuée. La notion de groupe étiquette un ensemble de structures cérébrales en mutuelles interactions. La notion de réseau épileptogène développée par le professeur Chauvel consacre l'existence d'une coopération entre aires cérébrales dans le déclenchement de la crise [1]. Il est aussi admis que le cerveau développe ses activités normales et pathologiques de manière répartie sur un mode partiellement hiérarchique. Il paraît judicieux de se poser la question de la dynamique de ce réseau en termes d'une succession de comportement produit par les interactions

entre groupes de structures cérébrales. Les questions fondamentales que pose ce travail sont celles-ci.

- Q1)** *Quelles sont les premières structures qui se déclenchent en termes de changement de rythme et de coopération avec d'autres structures ?*
- Q2)** *Comment ces groupes évoluent-ils au cours du temps ?*
- Q3)** *Ces groupes sont-ils reproductibles d'une crise à une autre ?*
- Q4)** *Comment certains groupes disparaissent et d'autres apparaissent ?*
- Q5)** *Quel est l'ordre d'apparition et de disposition des groupes ?*
- Q6)** *Qu'est-ce qui caractérise la synchronisation des groupes lors du passage de l'activité normale à l'activité critique ?*
- Q7)** *Quelle est l'étendue du réseau épileptogène pour plusieurs crises du même patient et éventuellement pour une même typologie de crise de différents patients ?*

Ces questions mettent l'accent sur un problème de « comportement », d'organisation et d'ordonnement de ces groupes dans les processus épileptiques. Répondre à ces questionnements c'est comprendre l'organisation des réseaux de structure cérébrale qui coopèrent dans les différentes phases des crises. L'étude de la dynamique des interactions mutuelles entre ces structures, suppose l'évaluation des paramètres quantitatifs à chaque instant et sur chaque paire de voies. L'évaluation de toutes les combinaisons possibles sur plus d'une centaine de canaux est quasiment impossible en un temps raisonnable. Les algorithmes de mesure de relation entre signaux sont « gourmands » en temps de calcul. Le problème de décision lié aux artefacts inhérents au processus d'acquisition et celui lié à l'interprétation nécessitent des connaissances *a priori*. Le formalisme agent basé sur les aspects d'auto-organisation coopératif au niveau micro [15] et [16] (en agissant localement sur les signaux) et d'émergence d'informations globales au niveau macro (en renseignant sur les structures cérébrales qui coopèrent dans les différentes phases des crises) semble pouvoir apporter une alternative à ces questionnements. Nous adressons ce problème d'analyse et d'interprétation des signaux SEEG à travers l'interaction d'un SMA dédié et d'une algorithmie signal robuste et déjà éprouvée dans l'étude des signaux épileptiques.

## 2.2. Agentification du problème

Le formalisme agent a donné lieu à trois familles d'approches qui se distinguent de par la décomposition qu'elles font du problème. L'*approche centrée tâche* qui est proche d'une division fonctionnelle classique, l'*approche centrée modèle* axée sur le modèle hiérarchique des concepts c'est dire les unités actives du système et l'*approche située* dans laquelle ce sont des entités parcellaires des données qui représentent les agents (vision bas niveau). Cette approche va à l'encontre de la modélisation classique et semble plus appropriée à l'analyse de la dynamique des réseaux neuronaux. La démarche adoptée consiste à transposer ce problème de traitement vectoriel des signaux dans un espace

agent où les entités du système coopèrent. Une approche située, coopérative et décentralisée, est proposée pour l'analyse des signaux intracérébraux. Il s'agit d'une approche dans laquelle un agent « signal » est associé à chaque voie SEEG. Les données (signaux)  $y$  sont vues comme un territoire à analyser par une société d'agent distribuée spatialement. Les agents « signaux » sont partitionnés en groupe d'agents de la même aire cérébrale, et un agent « structure » est associé à chaque aire cérébrale distincte. La notion d'aire cérébrale pour la définition des agents « structure » est basée sur des critères anatomiques obtenus à partir des informations sur l'implantation des électrodes (position de l'électrode et numéro du capteur) qui renseignent précisément les différentes aires cérébrales ciblées par l'exploration préchirurgicale faite par le clinicien. Pour faire face à la redondance des informations liées à la proximité entre capteurs, les agents « signaux » se regroupent (localement) dans chaque partition pour se fusionner par élection d'un leader par groupe homogène. La modélisation part de l'idée que l'on a affaire à un ensemble de groupes neuronaux (sous systèmes) pouvant présenter, sur une fenêtre temporelle donnée, des activités paroxysmiques de différentes natures et des interactions plus ou moins prononcées induisant les comportements de ces groupes. Le problème posé consiste alors à corroborer les questions posées dans la section précédente et surtout à les mettre en évidence sur la base d'un signal vectoriel  $S(t) = [S_1(t), \dots, S_N(t)]$  observé sur un ensemble de structures cérébrales  $C(t) = [C_1, \dots, C_P]$  sur un intervalle  $[0, T]$ . Autrement dit, il consiste à :

- i) *caractériser chacune des voies SEEG  $S_i(t)$ ,*
- ii) *déterminer les relations (statistique, similarité, synchronisation) entre les voies  $S_i(t)$ ,*
- iii) *étudier l'organisation d'ensemble à partir de l'analyse des signaux  $S_i(t)$  et,*
- iv) *relier à la notion de couplage fonctionnel entre structures aux quantités fournies par les méthodes de traitement du signal.*

L'architecture qui porte cette solution sera ainsi composée de trois types d'agents.

- A1)** Un agent « signal » ( $S_i$ ) associé à chaque signal  $S_i(t) (i \in [0 - N])$ , il évolue dans un environnement où existent d'autres agents « signaux » (figure 1). Ses principaux attributs sont la réactivité, l'adaptabilité, la continuité temporelle, et la confiance à ses voisins.
- A2)** Un agent « structure » ( $C_k$ ) associé à chaque région cérébrale regroupant plusieurs agents « signaux » ( $k \in [0 - P]$  et  $P < N$ ). Il est doté d'attributs cognitifs, de continuité temporelle, d'arbitrage.
- A3)** Des agents de contrôle : un agent « manager » (« scheduler ») ( $G_0$ ) fait le lien entre l'utilisateur et le SMA, un agent « serveur » ( $B_s$ ) gère la base de données des agents « signaux » et un agent « observateur » ( $O_s$ ) joue le rôle de superviseur global (figure 1).

### 3. Démarche méthodologique

Afin d'assurer la coordination des agents, notre choix s'est porté sur une architecture (figure 1) hybride répartie en deux niveaux ; un bas niveau composé des agents « signaux » qui cherchent à repérer les signaux d'intérêt et un haut niveau constitué des agents « structure » qui supervisent localement les agents de bas niveau. Les agents « signaux » collaborent collectivement pour faire émerger le but du système c'est-à-dire étudier et analyser la dynamique des structures similaires et celles qui sont synchronisées tout en minimisant le nombre d'opérations à effectuer.

#### 3.1. Typologie et structure des agents

##### 3.1.1. Les agents « signaux »

Ils sont réactifs et quantifient les événements caractéristiques de l'épilepsie à partir du comportement d'« exploration ». Ils sont les opérateurs de bas niveau et sont chargés d'exécuter les différents traitements. Ils coopèrent localement pour se réunir et diffusent leurs connaissances à leur voisinage pour étendre leur groupe. Ils fusionnent également par sélection d'un représentant (leader) par groupe quand ils présentent les mêmes propriétés

au sein d'une même aire cérébrale. Le leader (agent élu) a la charge d'évaluer les liens de similarité et de relation de son groupe avec les autres groupes. Il doit aussi faire bénéficier aux membres de son groupe homogène de ses « affinités » par le biais du comportement de « rattachement ».

##### 3.1.2. Les agents « structure »

Ils supervisent localement les différents groupes d'agents « signaux », ils sont dotés d'attributs cognitifs et sont associés à chaque aire cérébrale distincte. Ils n'effectuent pas de traitement spécifique mais interprètent sous forme de décision, sélection et regroupement des résultats locaux obtenus par les agents « signaux ». Ils sélectionnent les agents représentant les groupes homogènes en contrôlant, par supervision des groupes formés, le processus de sélection des agents « signaux » d'intérêt. Le processus de sélection est déclenché lorsqu'un groupe d'agents « signaux » homogènes est identifié dans une partition.

##### 3.1.3. Les agents de contrôle

L'agent « scheduler » fait le lien entre l'utilisateur et le SMA, c'est le point d'entrée du système, il permet le paramétrage de la méthode. Il simule la synchronisation des agents à partir de leur exécution séquentielle. Il définit la politique d'ordonnement de l'exécution des tâches de toutes les entités du SMA. L'agent « serveur » joue le rôle de base de données pour les agents « signaux ». L'agent « observateur » répond aux besoins

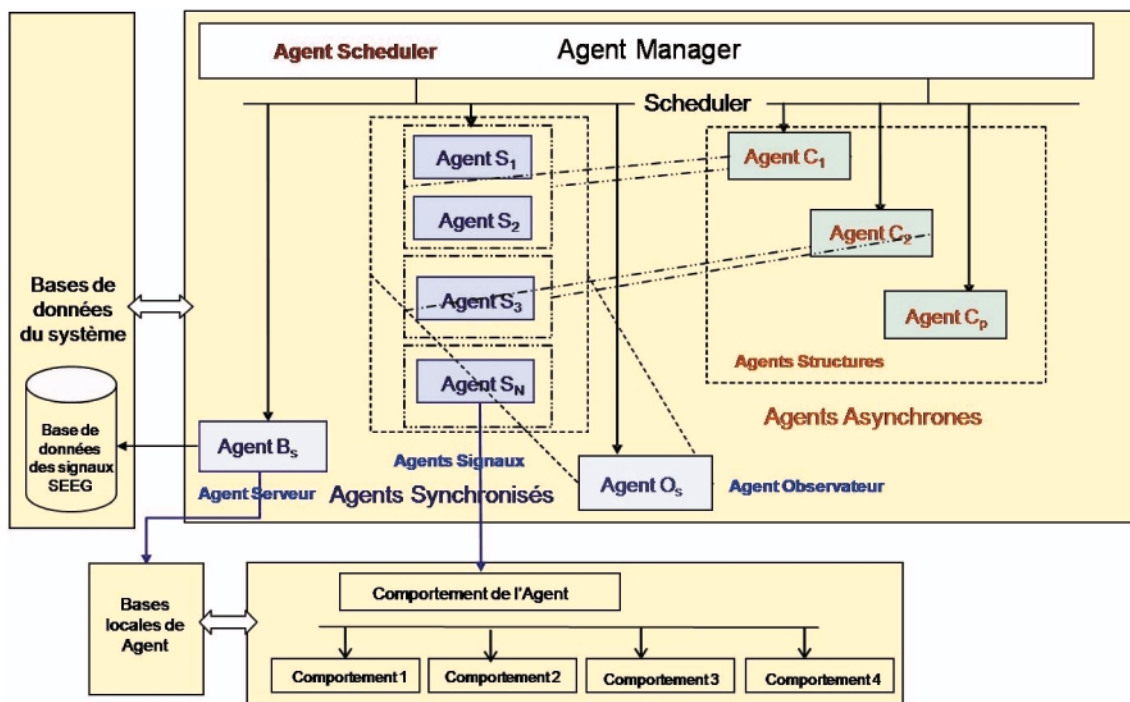


Figure 1. Architecture générale de la plateforme. Cette plateforme est implantée grâce au kit de développement Madkit [17]. L'analyse se fait par cycle, où sont analysés en parallèle et de façon synchrone les échantillons de signal sur une fenêtre glissante.

de synchronisation des traitements en surveillant l'exécution avant la progression du processus d'analyse. Il assure l'attente pour faire évoluer le temps commun à l'aide d'un cadencement d'ensemble des agents « signaux » grâce à une coordination avec l'agent « scheduler ». Il fait le lien entre les différentes localisations ciblées (réunion des résultats locaux).

### 3.2. Communication et coopération entre agents

Pour communiquer, les agents sont dotés d'un langage de communication commun comme standard. La communication est directe, elle se fait par des échanges de messages asynchrones de deux manières différentes : (1) soit d'agent à agent (point à point) identifiés par leurs adresses (AgentAdress), (2) soit par diffusion sélective (multicasting) à tous les agents appartenant à un même groupe. Les différents aspects coopératifs [18] exploités dans ce travail concernent la coopération confrontative par fusion pour faire face aux incertitudes dans les prises de décision et la coopération par priorité pour la sélection d'un leader par groupe homogène. Lorsqu'ils sont activés, les agents « signaux » sont regroupés quand ils présentent des propriétés individuelles similaires dans chaque structure cérébrale. Pour cela, chaque agent "signal" dispose de trois bases locales détaillées ci-dessous :

- B1)** Base  $B_1$ , elle contient la liste des « attractions » de l'agent « signal » c'est-à-dire les agents accointants avec lesquels il désire former un groupe homogène car les liens de similarité sont forts.
- B2)** Base  $B_2$ , elle renferme la liste des « répulsions » de l'agent « signal » c'est-à-dire les agents avec qui les liens de similarité ne sont pas possibles (différences flagrantes).
- B3)** Base  $B_3$ , elle contient la liste des « incertitudes » c'est-à-dire les agents avec lesquels les liens de similarité sont incertains et donc une décision par coopération est nécessaire (confrontation).

La décision concernant les situations d'incertitudes (base  $B_3$ ) est prise suivant les deux règles de coopération suivantes.

- R1)** Règle de coopération 1 : *Accepter dans la base des attractions ( $B_1$ ) d'un agent « signal » tout agent présentant une même attraction que lui s'il ne remplit pas la règle de coopération 2.*
- R2)** Règle de coopération 2 : *Refuser dans la base des attractions ( $B_1$ ) d'un agent « signal » tout agent rejetant une de ses attractions ou acceptant un de ses rejets.*

#### 3.2.1. Les comportements des agents « signaux »

Les agents « signaux » possèdent des compétences relatives soit à l'interaction avec les autres agents, soit au traitement du signal qu'ils effectuent. La figure 2 fournit le réseau de Pétri explicatif du contrôle de l'agent « signal ». Elle montre nettement que les quatre activités de l'agent sont réalisées de manière atomique.

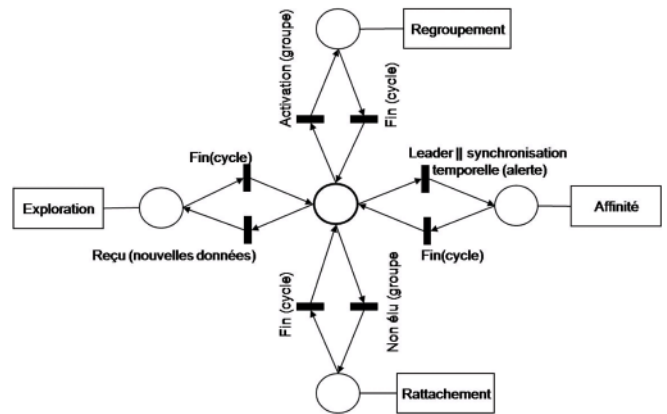


Figure 2. Réseau de Pétri explicatif des comportements des agents « signaux ». Le réseau met directement en correspondance les états et les compétences à exécuter du fait de la réactivité de l'agent « signal ». Ses quatre états sont : (i) Exploration, (ii) Regroupement, (iii) Affinité et (iv) Rattachement.

L'agent « signal » n'est pas « multitâche » mais la relation hiérarchique avec son agent « structure » apparaît très clairement au travers de certaines transitions dont les prédicats s'expriment en fonction des choix de son agent « structure » (choix du leader par exemple). Cette relation hiérarchique se manifeste également lorsque l'agent « observateur » détecte une synchronisation temporelle des changements d'activités sur plusieurs agents issus de plusieurs structures. La détection de cette synchronisation peut aboutir à un ordonnancement d'une recherche d'affinité entre agents « signaux ». L'exploration (extraction des propriétés de l'agent) ne s'active que si de nouvelles données sont reçues. Le rôle de cette compétence est de définir l'état d'activation de l'agent « signal ». Le regroupement ne s'active que lorsque l'agent est actif et ne s'applique qu'à un groupe d'agents homogènes de la même aire cérébrale. L'affinité ne s'active pour un agent « signal » que lorsqu'il est élu leader de groupe ou lorsque l'agent « observateur » détecte une synchronisation temporelle des alertes symbolisant les fortes modifications des fréquences des activités de agents « signaux ». Elle recherche des liens entre leaders, elle peut être étendue à d'autres agents non sélectionnés sur demande de l'agent « observateur » lors d'une détection de synchronisation temporelle des changements d'activités. Le rattachement s'active sur les agents non sélectionnés et appartenant à un groupe homogène (rattachés à un leader). Il permet aux agents non sélectionnés de bénéficier des propriétés collectives de leur leader. Le regroupement a été décomposé en *réunion* et *diffusion* à l'aide de réseau de Pétri (figure 3). La réunion est basée sur une coopération locale des agents et utilise la confrontation des propriétés singulières des agents. Elle régit les règles de remplissage des bases locales de chaque agent « signal » tandis que la diffusion contrôle l'extension des groupes d'agents similaires par la transmission des bases locales aux agents inscrits dans la

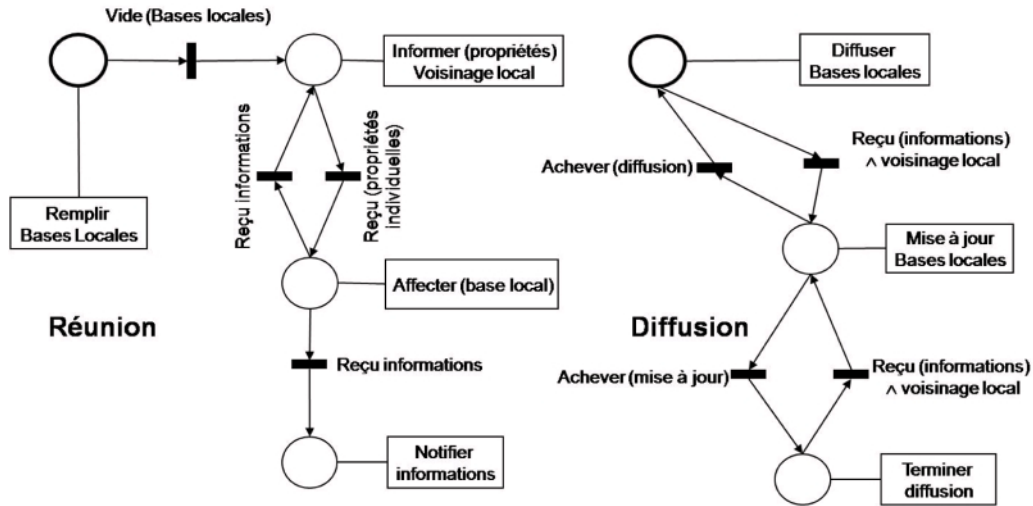


Figure 3. Décomposition de la tâche regroupement en tâches de réunion et de diffusion. La réunion construit progressivement les plans locaux de fusion tandis que la diffusion étend les groupes d'agents homogènes suivant des règles d'attraction et de répulsion.

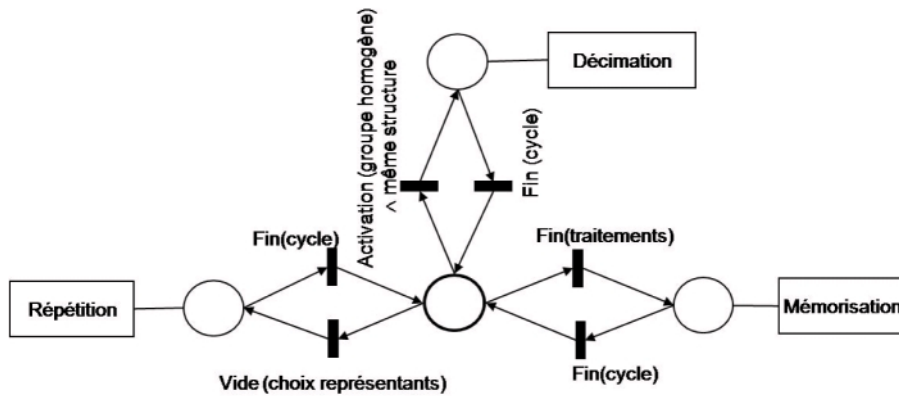


Figure 4. Réseau de Pétri explicatif des comportements de l'agent « structure ». L'agent « structure » possède trois états reprenant les grandes fonctionnalités de l'agent (répétition, décimation et mémorisation).

base des incertitudes. L'agent diffuse ses bases  $B_1$  et  $B_2$  à ses «incertitudes» et met à jour celles-ci lorsqu'il reçoit des informations provenant d'un autre agent suivant les deux règles de coopération définies ci-dessus.

### 3.2.2. Les comportements des agents «structure»

L'agent «structure» est doté de trois compétences (*répétition*, *décimation* et *mémorisation*) cf. figure 4. La répétition permet de lever certaines ambiguïtés dans le choix des représentants des localisations cérébrales, la décimation effectue ce choix et la mémorisation assure la sauvegarde des éléments caractéristiques de la structure cérébrale étudiée en vue d'une exploitation au niveau de l'interprétation. L'agent considère une situation comme ambiguë lorsqu'il n'identifie pas de représentant pour sa structure ou lorsqu'il en identifie plus de deux. Dans cette situa-

tion les représentants de la structure seront portés sur ceux du cycle (instant) précédent. La décimation réduit le nombre d'agents de façon mécanique par sélection d'un agent leader par groupe homogène, elle permet d'obtenir les agents «signaux» d'intérêt. Le choix du leader se fait par ordre de priorité préétablie sur les propriétés individuelles des agents «signaux». La priorité est d'abord portée sur l'instant précis où l'agent passe d'un état inactif à un état actif. Lorsque cet instant, encore appelé «*tempsInitialActivation*», est identique pour plusieurs agents signaux, la priorité ira à l'agent «signal» qui a l'indicateur scalaire le plus élevé. Sinon la priorité est détenue par l'agent qui présente l'énergie totale la plus élevée. La mémorisation est déclenchée lorsqu'un agent «structure» détecte la fin des traitements de ces agents «signaux». Il s'agit d'une sauvegarde des résultats des traitements partiels des agents «signaux» et des caractéristiques de la structure explorée.

### 3.3. Mise en œuvre et approche algorithmique

L'algorithmie signal comprend l'analyse spectrale, et les coefficients d'intercorrélation linéaire et non linéaire. L'analyse spectrale évalue l'énergie en sous bandes étudiées dans l'ensemble des signaux. Elle est calculée à partir de la méthode du périodogramme (équation 1) où  $x_{k,m}(n)$  représente le signal tronqué, la valeur  $k$  fixe le nombre  $m$  de section différente du signal,  $\pi_{k,m}(f)$  est le périodogramme de la section de numéro  $m$ ,  $\overline{\pi_k(f)}$  est le périodogramme moyenné et  $FFT$  désigne la transformée de Fourier rapide.

$$\pi_{k,m}(f) = \frac{1}{k} \|FFT(x_{k,m}(n))\|^2 \text{ et } \overline{\pi_k(f)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \pi_{k,i}(f) \quad (1)$$

L'analyse de relation linéaire entre signaux met en évidence les liens entre groupes de signaux appartenant à la même aire cérébrale lorsque la mesure de similarité n'est pas suffisante. Elle est calculée à partir du coefficient d'intercorrélation linéaire  $r^2$  dont nous rappelons l'équation 2 entre deux observations  $x$  et  $y$ .

$$r_{x,y}^2 = \frac{\text{cov}^2(x,y)}{\text{var}(x) * \text{var}(y)} \quad (2)$$

où  $\text{cov}() = \text{covariance}()$  et  $\text{var}() = \text{variance}()$

L'analyse des relations non linéaires entre signaux quantifie les liens de causalité entre groupes de signaux appartenant à des structures cérébrales distinctes. Ce calcul est donné par le coefficient de régression non linéaire  $h^2$  (équation 3) où pour deux observations  $x$  et  $y$ ,  $f(y|x)$  est la probabilité conditionnelle de  $y$  à  $x$  fixée.

$$h_{x,y}^2 = 1 - \frac{E(y - \mu_{x|y}(x))^2}{\text{var}(y)} \text{ où } \mu_{x|y} = \int_{-\infty}^{+\infty} y * f(y|x) dy \quad (3)$$

L'étude des relations entre signaux est essentielle pour la description de l'organisation du réseau formé par les structures cérébrales qui coopèrent dans l'initiation des crises. L'intérêt des méthodes non linéaires repose d'abord sur le fait que les mécanismes de génération des signaux cérébraux sont non linéaires. L'évaluation d'un faible degré de relation linéaire entre deux signaux ne permet pas de conclure systématiquement sur l'inexistence d'interaction entre ces signaux. Ces interac-

tions peuvent bien résulter d'un processus non linéaire qui se traduirait naturellement par une relation non linéaire. D'une manière générale, lorsqu'une relation entre deux signaux  $x$  et  $y$  est linéaire alors  $h_{x,y}^2 = r_{x,y}^2$  et le coefficient  $r^2$  est moins « gourmand » en temps de calcul que le coefficient  $h^2$ , le choix d'appliquer le  $r^2$  entre signaux de la même structure pour renforcer les liens de similarité et le  $h^2$  entre leaders représentants les différentes structures repose sur le fait que la combinatoire est plus importante entre signaux de la même structure qu'entre signaux leaders. De plus nos travaux antérieurs sur les crises d'épilepsie du lobe temporal ont souligné l'importance des relations linéaires entre signaux de la même structure du fait de la redondance des informations liée à la proximité entre capteurs qui délivrent les signaux. La caractérisation des propriétés individuelles de chaque agent « signal » se fait (à chaque instant) en trois étapes sur une fenêtre glissante de 2 à 6s :

- i) évaluation de l'énergie du signal  $S_i(t)$  en sous bandes,
- ii) construction d'un vecteur caractéristique  $\Gamma_{S_i(t)}$  pour chaque  $S_i(t)$  et,
- iii) codage numérique du vecteur en un indicateur scalaire  $C_{S_i(t)}$ .

Les équations 4 et 5 ci-dessous donnent respectivement les composantes du vecteur caractéristique et le codage de l'indicateur scalaire. Chaque agent « signal »  $S_i$ , suivant la fenêtre courante, est associé à  $C_{S_i(t)}$  qui code le contenu spectral de son signal et à  $\Gamma_{S_i(t)}$  qui représente la répartition de son énergie en sous bande. Les bandes de fréquence utilisées sont caractéristiques de l'EEG (tableau 1).

$$\Gamma_{S_i(E_{i\epsilon_0}, E_{i\epsilon_1}, E_{i\epsilon_2}, E_{i\epsilon_3}, E_{i\epsilon_4}, E_{i\epsilon_5}, E_{i\epsilon_6}, E_{i\epsilon_7}, E_{i\epsilon_8})}$$

$$\text{où } E_{i\epsilon_k} = \frac{e_{i\epsilon_k}}{e_{i\epsilon_T}} \quad 0 \leq E_{i\epsilon_k} \leq 1 \quad (4)$$

Où  $e_{i\epsilon_k}$  est l'énergie dans la bande  $\epsilon_k$   $0 \leq k \leq 8$  et  $e_{i\epsilon_T}$  représente l'énergie totale du signal dans la bande  $\epsilon_T$ .  $E_{i\epsilon_k}$  est le pourcentage de l'énergie totale dans la bande  $\epsilon_k$ .

$$C_{S_i(t)} = 2^0 * E_{i\epsilon_0} + 2^1 * E_{i\epsilon_1} + \dots + 2^7 * E_{i\epsilon_7} + 2^8 * E_{i\epsilon_8} \quad (5)$$

Tableau 1. Bandes de fréquence classiquement utilisées en épilepsie.  $\epsilon_k$  correspond à la notation de la bande incluse dans les équations.

Bandes	$\delta_1$	$\delta_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\alpha_1$
Intervalles (Hz)	[0 – 1.9]	[1.9 – 3.4]	[3.4 – 5.4]	[5.4 – 7.4]	[7.4 – 10]
Noms	$\epsilon_0$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$
Bandes	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\gamma_1$	$T$
Intervalles (Hz)	[10 – 12.4]	[12.4 – 18]	[18 – 24]	[24 – 128]	[0 – 128]
Noms	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_T$

Les conditions définissant l'état d'activation d'un agent « signal » sont résumées ci-dessous.

- C1)** Détection d'un changement significatif dans les composantes du vecteur caractéristique dans le sens croissant.
- C2)** Activation des deux agents du voisinage le plus proche.
- C3)** Existence d'une forte relation (cycle précédent) avec un agent actif (cycle courant) d'une autre structure cérébrale.
- C4)** Détection d'un changement significatif dans les composantes du vecteur caractéristique dans le sens décroissant.
- C5)** Énergie du signal exclusivement concentrée dans les activités basses fréquences.

L'agent tend vers l'état actif lorsqu'il remplit l'une des conditions 1, 2 ou 3 et il tend vers l'état inactif lorsqu'il remplit les conditions 4 ou 5. Lorsqu'un agent « signal » est dans une situation ambiguë, le choix de son état obéit à des règles de priorité préétablies. La condition 3 est prioritaire, suivent ensuite la condition 5 puis 1, puis 2 et enfin la condition 4 qui est la moins prioritaire.

Dans la pratique un changement est significatif (conditions 1 et 4) lorsque  $D(\Gamma_{S_i(t)}, \Gamma_{S_i(t-\delta t)}) \leq \eta_G$  (équation 6) ou lorsque  $d_k = \left| \Gamma_{S_i(t)}^{(k)} - \Gamma_{S_i(t-\delta t)}^{(k)} \right| \geq \eta_e$  où  $\Gamma_{S_i(t)}^{(k)}$  est la composante de rang  $k$ , du vecteur  $\Gamma_{S_i(t)}$ .  $\eta_G$  et  $\eta_e$  désignent respectivement un seuil global et un seuil élémentaire dynamiquement fixés sur l'énergie du signal (cf. 4.). Le sens de variation  $\psi = C_{S_i(t)} - C_{S_i(t-\delta t)}$  est quantifié par l'écart des indicateurs scalaires. Le sens croissant correspond à un  $\psi \geq 0$  et le sens décroissant à un  $\psi < 0$ .

$$D(\Gamma_{S_i(t)}, \Gamma_{S_j(t)}) = \sum_{k=0}^8 \left| \Gamma_{S_i(t)}^{(k)} - \Gamma_{S_j(t)}^{(k)} \right| \quad (6)$$

Le remplissage des bases locales entre deux agents suit les règles suivantes :

- R1)**  $S_k$  est inscrit dans les « attractions » (base  $B_1$ ) de  $S_i$  lorsque la distance euclidienne entre leurs propriétés individuelles est inférieure à un seuil d'acceptation  $\eta_A$  ( $D(\Gamma_{S_i(t)}, \Gamma_{S_k(t)}) \leq \eta_A$ ).
- R2)**  $S_k$  est inscrit dans les « répulsions » (base  $B_2$ ) de  $S_i$  lorsque  $D(\Gamma_{S_i(t)}, \Gamma_{S_k(t)}) \geq \eta_R$ .
- R3)**  $S_k$  est enregistré dans les « incertitudes » (base  $B_3$ ) de  $S_i$  lorsque  $\eta_R \leq D(\Gamma_{S_i(t)}, \Gamma_{S_k(t)}) \leq \eta_A$ .

$\eta_A$  (seuil d'acceptation) et  $\eta_R$  (seuil de rejet) sont dynamiquement fixés (cf. 4.) de manière à regrouper les éléments très similaires et à séparer ceux présentant des différences flagrantes.

La notion de proche voisinage (condition 2) exploite la proximité des capteurs SEEG qui délivrent le signal, chaque agent « signal » possède deux proches voisins. L'existence d'une forte relation avec un agent actif (condition 3) interdit la désactivation de l'agent lorsqu'il l'entretient avec un agent appartenant à une autre structure cérébrale. Enfin la condition 5 peut entraîner la désactivation de l'agent « signal » lorsque celui-ci identifie l'absence totale d'activité haute fréquence dans les composantes de son vecteur  $\Gamma_{S_i(t)}$ . C'est-à-dire lorsque les composantes  $E_{i\epsilon_k}$  ( $4 \leq k \leq 8$ ) du vecteur  $\Gamma_{S_i(t)}$  sont toutes inférieures à 5% de l'énergie totale du signal car une grande partie de

l'énergie du signal (au moins 75 %) est concentrée dans les bandes  $\delta$  et  $\theta$  dans ce cas. Chaque agent « signal » dispose également d'une variable « *tempsInitialActivation* » qui signe l'instant du début de son activation (événement critique), elle reste invariable tant que l'agent « signal » est actif, elle passe à zéro lorsque l'agent passe à un état inactif et elle prend le temps courant si l'agent redevient actif. Cette variable permet de décrire les différentes séquences d'activation des structures cérébrales explorées. La caractérisation des propriétés collectives des agents « signaux » s'appuie sur leur regroupement par des critères de : i) similarité, ii) relation statistique et iii) synchronisation entre agents. Durant le processus d'analyse de la crise sur le plan temporel, l'agent « observateur » produit des graphes de couplage statistique et des nappes spatio-temporo-spectrales au niveau global grâce aux variables supervisées sur les agents « signaux ». L'agent « superviseur » s'appuie sur le calcul des distances entre graphes successifs pour répondre aux questions soulevées dans la section 2.1. Le graphe produit à l'instant  $t$  noté  $G_t$  est donné par l'équation 7, où  $M$  est le nombre des structures cérébrales ciblées,  $S_k$  ( $0 \leq k \leq M$ ) est l'agent retenu pour la structure  $k$  et  $\xi$  est la distance entre graphes successifs (équation 8).

$$G_t = \begin{bmatrix} 1 & h_{S_1, S_2}^2 & \cdots & h_{S_1, S_M}^2 \\ \vdots & 1 & \ddots & \vdots \\ h_{S_M, S_1}^2 & h_{S_M, S_2}^2 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\xi = D(G_t, G_{t-\delta t}) = \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^M |h_{S_k, S_l}^2(t) - h_{S_k, S_l}^2(t - \delta t)|$$

Le lien retenu entre deux structures porte sur la valeur la plus élevée du coefficient entre les élus de la structure explorée. C'est l'étude de l'évolution de  $\xi$  qui va traduire la dynamique spatio-temporelle de la crise analysée en matérialisant la dynamique des modifications organisationnelles.

## 4. Résultats expérimentaux

Nous avons délibérément choisi de nous appuyer sur une démarche orientée par les données SEEG dans cette étude mais le nombre de crises d'épilepsie analysé (au moins 20), avec des résultats nous le verrons plus loin assez constants apporte raisonnablement de la pertinence à notre démarche. La plateforme développée ambitionne ainsi :

- i) localiser les structures d'intérêts porteurs d'informations de groupe afin d'éviter l'explosion combinatoire,
- ii) relier ses structures d'intérêt au travers des relations privilégiées,
- iii) associer les régions cérébrales à ces structures d'intérêt afin de déterminer les éléments de structuration des réseaux des structures cérébrales qui coopèrent,



- iv) exploiter la structuration en réseau pour déterminer la typologie des crises d'épilepsie et enfin,
- v) proposer une classification des crises au regard des éléments de structuration du réseau déterminé.

Pour répondre au **i)** nous avons mis en place une approche basée sur l'élection d'un agent leader, représentant une entité homogène. Des graphes de couplage inter-structures ainsi que l'étude des dynamiques inter-graphes apportent des réponses aux points **iii)** et **iv)** alors que des éléments de structuration en réseau orientent sur la typologie des crises et plus particulièrement sur la classification des crises d'épilepsie partielles du lobe temporal (**v**). Les résultats de la méthodologie sont présentés en détails sur 4 patients souffrant d'une épilepsie du lobe temporal. Les seuils expérimentaux pour le paramétrage de la méthode sont dynamiquement fixés de manière à réunir progressivement les agents suivant les critères d'attraction et de répulsion. Ils sont évalués par rapport au pourcentage de l'énergie totale du signal  $\eta_A = 20\%$  de l'énergie totale,  $\eta_R = 80\%$ ,  $\eta_G = 50\%$  et  $\eta_e = 20\%$ .

#### 4.1. Résultats de la sélection des agents « signaux » d'intérêt

Une des difficultés de notre stratégie de contrôle est de maîtriser le volume de données à traiter à chaque instant. La classification collaborative multicritère [19] des agents « signaux » a permis une sélection pertinente des signaux d'intérêt grâce à l'élection des leaders porteurs d'informations de groupe. La figure 5, souligne sur les crises analysées les rapports entre agents « signaux » situés, agents activés et agents leaders, elle montre une réduction significative de la charge du système. La plateforme analyse tous les signaux enregistrés lors de l'investigation préchirurgicale et sélectionne dynamiquement ceux d'intérêt, le nombre de signaux analysés dépend du nombre des capteurs explorant le patient.

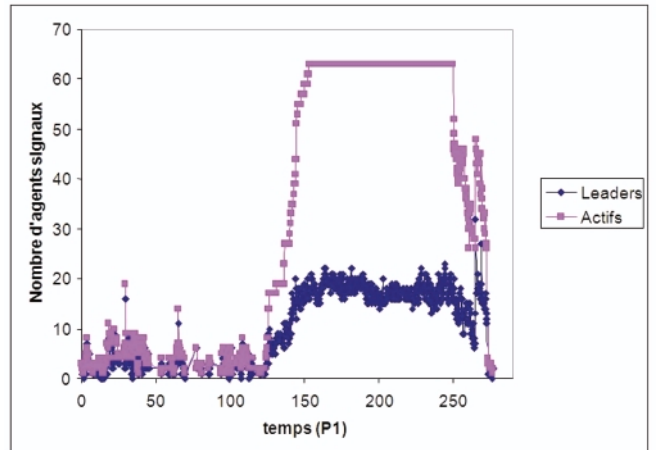


Figure 5. Dynamique du nombre d'agents actifs et du nombre d'agents leaders pour le patient P1. La courbe rose représente l'évolution du nombre d'agents « signaux » activés et la courbe bleue renseigne sur l'évolution du nombre d'agents représentant de groupe lors des traitements. Agents « signaux » associés (AS) = 89, nombre maximum d'agents activés (NMA) = 65 (73 % de AS) et nombre d'agents leaders au maximum (ALM) = 25 % (38 % de NMA).

#### 4.2. Analyse des nappes spatio-temporo-spectrales

Afin de dégager des éléments pertinents d'analyse pour répondre aux points **ii)**, **iii)** et **iv)** la plateforme développée permet d'élaborer au travers de l'agent « observateur » une représentation complète de la crise sous forme de nappe spatio-temporo-spectrale colorée (figure 6). Cette nappe renseigne clairement sur la cartographie des activités de fréquence essentielles dans toute analyse de crise d'épilepsie. Elle met en évidence l'étendue des activités paroxystiques tout en fournissant une vision globale des zones cérébrales singulièrement impliquées dans les processus pathologiques.

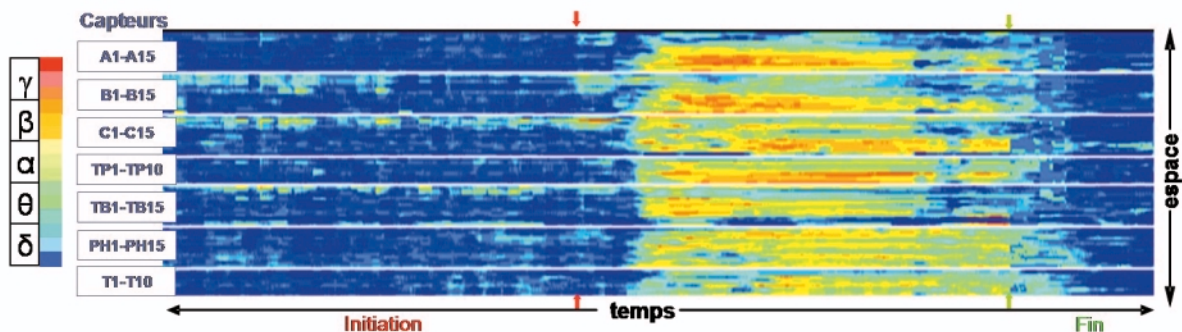


Figure 6. Nappe spatio-temporo-spectrale colorée du patient P1. Elle représente en fonction du temps et de l'espace, les activités contenues dans chacune des voies enregistrées et permet d'observer une vision d'ensemble de la crise analysée. Les couleurs « froides » et « chaudes », variant du bleu au 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 (haut en bas). Chaque électrode est repérée par une lettre (A, B, C...).

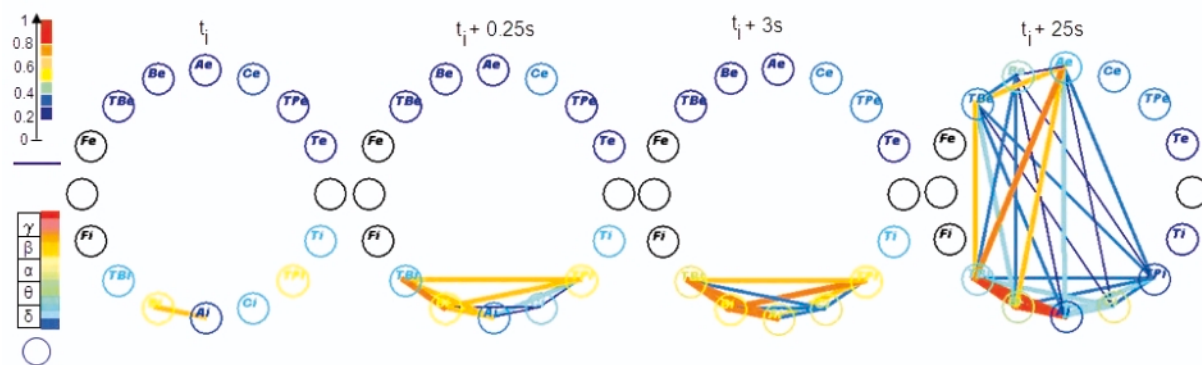


Figure 7. Graphes des couplages inter-structures. Les structures cérébrales sont représentées par les cercles, les lettres sur les cercles symbolisent les électrodes qui ont exploré ces structures et les indices  $i$  et  $e$  signifient structure interne et externe. Les agents « structure » sont les nœuds et les liens entre agents leaders symbolisent les arcs. Les degrés des liaisons (compris entre 0 et 1) sont codés par une couleur variant du bleu au rouge d'intensité variable (rouge lorsque la liaison est supérieure à 0.8, orange entre 0.7 et 0.8, bleu entre 0.2 et 0.3 et pas de connectivité entre structure lorsque ce degré est inférieur à 0.2).

C'est ainsi que l'observation de la nappe spatio-temporo-spectrale du patient P1 (figure 6) montre des activités critiques très localisées et une très nette implication d'un grand nombre de voies SEEG dans la propagation des décharges paroxystiques. Un rôle systématiquement précoce de l'hippocampe antérieur et postérieur (activités et sur les plots internes des électrodes B et C) et du cortex entorhinal (activités et sur les plots internes de l'électrode TB) semble se dégager chez ce patient.

### 4.3. Analyse des graphes de couplage inter-structures

La crise étant ainsi marquée par les nappes (paragraphe précédent), la plateforme SMA produit également, au cours du processus d'analyse des graphes des couplages inter-structures symbolisant les liens entre structures explorées. Ces liens sont représentés par les relations de similarité (nœuds du graphe) qui sont mis en évidence dans notre étude par un jeu de couleurs qui codent l'activité de fréquence dominante dans la structure. C'est-à-dire celle du leader du groupe dominant dans la structure. On considère qu'un groupe est dominant dans une structure lorsqu'il compte le plus grand nombre d'agents « signaux ». Le degré de couplage est caractérisé par la mesure de relation linéaire ou non entre les combinaisons de paire de voies représentées par des leaders. La figure 7 donne un exemple de représentation des graphes à différents instants d'une crise du lobe temporal du patient P1. Elle montre que les structures impliquées dans les processus épileptiques se réorganisent au cours des différentes phases de la propagation des activités critiques. Elle décrit également de manière tout à fait réaliste l'organisation du réseau des structures cérébrales qui coopèrent dans l'initiation, dans les phases de propagation et de diffusion de l'activité paroxystique. C'est ainsi que la mesure des distances euclidiennes entre graphes successifs nous a permis de quantifier et

de caractériser la dynamique des modifications organisationnelles (figure 8). Des graphes très proches durant les phases intercritiques, symbolisés par de faible distance entre graphes successifs sont observés. On note des différences significatives aux instants de transition entre les différentes phases, et enfin des oscillations plus ou moins stables durant chaque phase viennent renseigner sur les synchronisations inter-structures.

### 4.4. Les éléments de structuration des réseaux

Muni des informations produites par les paragraphes précédents et en tenant compte de la configuration globale des agents « signaux », des séquences d'activation, de leur durée ainsi que de la chronologie des événements critiques mis en jeu, la plateforme SMA produit finalement des éléments d'interprétation et de typologie de la crise analysée, son ordonnancement, l'instant

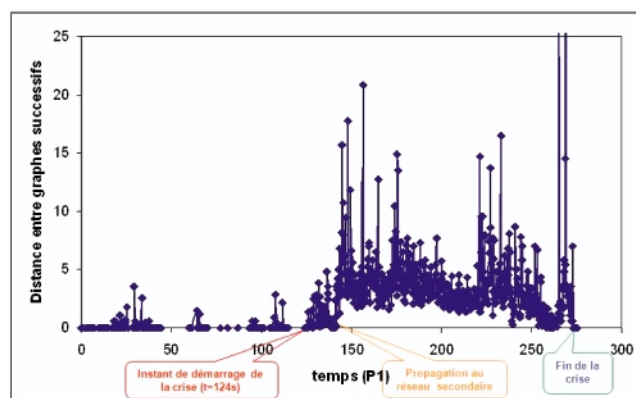


Figure 8. Distance entre graphes successifs du patient P1. Ces courbes suivent la dynamique induite par les synchronisations brutales caractérisant les différentes phases (initiation, propagation et fin de la crise) de la crise.

du début de crise, et les aires cérébrales qui composent le réseau de la zone épileptogène (*ZE*) et celles du réseau de propagation (*RP*). Une séquence d'activation est définie comme étant une période de temps pendant laquelle plusieurs agents « signaux » coopératifs restent dans un état actif. Le système cherche à aller plus loin en proposant un outil capable grâce à quelques informations *a priori* (cliniques, physiologiques, spatiales) de déterminer de manière automatique le type de crise analysée, les zones cérébrales initiatrices de la crise en s'appuyant sur des travaux effectués dans notre groupe de recherche concernant la typologie des crises du lobe temporal [20]. Le premier élément structurant les réseaux concerne les différentes séquences d'activation. Il s'agit de repérer les situations caractéristiques des événements intercritiques et/ou critiques afin de cibler les traitements opératoires. La détection de ces événements permet d'identifier les sous-ensembles de voies conjointement activés, de marquer les moments clés qui permettent de décrire précisément l'organisation des activités qui se mettent en place. Le deuxième élément de structuration du réseau d'agents est donné par les relations de voisinage entre les agents. Dans la pratique, ces relations sont prises en compte dans les processus de traitement (formation des groupes locaux), dans la construction de l'état de l'agent (actif et inactif) mais elles peuvent aussi contribuer à maintenir un agent « signal » dans un état actif lorsque celui-ci est fortement lié à d'autres agents actifs. Le dernier et troisième élément de structuration du réseau est donné par la coopération face à l'incertitude qui permet comme on l'a déjà souligné de définir précisément les aires cérébrales qui coopèrent.

#### 4.5. Intérêt de la méthode et validation de la fusion des agents

L'expérimentation des algorithmes de classification floue (fuzzy c-means), basée sur les critères de similarité et exploitant le coefficient  $h^2$  pour mesurer toutes les relations entre paire de voies SEEG, est très limitée par le temps de calcul. Ce dernier, estimé sur un ensemble de 100 voies avec une fenêtre glissante de 4s a nécessité plus de deux jours de calcul sur un poste pentium 4 de 2Go de mémoire. L'analyse de cet enregistrement par notre plateforme ne nécessite que quelques minutes avec des résultats quasi-similaires. L'optimisation des traitements étant basé sur une fusion des agents porteurs des mêmes informations, une évaluation de la classification des agents est faite par une mesure de couplage entre agents homogènes à travers deux méthodes de mesure de couplage statistique. L'évaluation consiste à mesurer systématiquement l'intercorrélacion linéaire ( $r^2$ ) et non linéaire ( $h^2$ ) à chaque regroupement d'agents homogènes. Normalement le système n'est pas sensé évaluer ces couplages puisqu'il les considère *a priori* significatifs. Les résultats de cette évaluation ont montré qu'en fixant un seuil des couplages significatifs très forts ( $> 0.7$  sur une échelle de 0 à 1), 36 % des évaluations sont satisfaites par le coefficient  $r^2$  contre 53 % pour le coefficient  $h^2$ . Tandis qu'en diminuant ce seuil de moins de 20 % on augmente à 79 % le nombre d'évaluations

satisfaisantes pour le coefficient  $r^2$  et à 91 % pour  $h^2$ . Les faibles couplages entre agents homogènes sont évalués à moins de 16 % pour  $r^2$  contre 7 % pour la régression non linéaire ( $h^2$ ). Le coefficient de régression non linéaire, retenu pour les mesures des couplages statistiques, semble ainsi validé la fusion des agents homogènes. Ayant choisi une démarche résolument orientée par les données, un problème de validation de l'approche dans sa globalité se pose mais quelques pistes de réflexion s'ouvrent sur la potentialité de l'approche multi-agents, sur l'intégration d'informations *a priori* sur l'anatomie cérébrale et l'interactivité entre le système et son utilisateur.

## 5. Conclusion

Nous avons adressé le problème de l'analyse des signaux SEEG comme la résolution d'un problème complexe et de nature distribuée. En nous appuyant sur le formalisme agent, nous avons proposé une approche combinée basée sur l'association du traitement du signal et un SMA qui impose une vision locale et décentralisée (grande modularité qui concerne chacun des 128 capteurs SEEG). Ainsi, l'expertise globale est distribuée entre plusieurs agents qui examinent le problème de façon collective en s'appuyant sur des stratégies de sélection des agents d'intérêt pour ne traiter que la partie des données susceptibles de fournir des informations utiles. Notre démarche permet notamment de renseigner sur la mise en jeu progressive des interactions mutuelles entre les régions cérébrales. Les voies prioritairement engagées dans le déclenchement des crises sont clairement significatives et les voies secondairement impliquées sont également bien référencées.

**Sur le plan méthodologique**, le formalisme agent a permis d'organiser, de contrôler les différents traitements, d'assurer leur coordination en intégrant au mieux les spécificités de chacune des méthodes afin de faire émerger toutes les combinaisons d'intérêt entre régions cérébrales. La méthode est générique, et tout à fait automatique et propose une analyse vectorielle des signaux SEEG sur l'ensemble des données enregistrées. Elle permet enfin de passer d'un réseau constitué d'agents autonomes et coopératifs vers des réseaux de structure cérébrale en interaction.

**Sur le plan clinique**, la méthode appliquée sur plusieurs crises de différents patients a permis d'identifier de manière globale l'ensemble des activités contenues dans les signaux, de sélectionner dynamiquement les signaux d'intérêt et de marquer la dynamique spatio-temporelle des activités durant la crise. L'analyse de cette dynamique au travers des nappes spatio-temporo-spectrales et des graphes de couplage statistique entre groupes de signaux renseignent de façon précise sur l'ordonnement des activités épileptiques (mise en évidence des groupes de signaux similaires, en relations ou synchronisés). Les sous-ensembles de voies simultanément activés durant les crises émergent ainsi à partir de ces regroupements.

**En fin**, la plateforme technologique ainsi développée se situe aux frontières de plusieurs domaines de recherche (traitement du signal, génie informatique et intelligence artificielle distribuée) et ouvre des perspectives notamment pour le monitoring des patients épileptiques. La démarche originale proposée et les premiers résultats obtenus nous donnent un espoir d'aller plus loin dans l'exploitation des techniques SMA pour l'aide au diagnostic de l'épilepsie au travers de la description de la propagation de la décharge lors des crises d'épilepsie et le traitement vectoriel du signal dans son ensemble. Les perspectives de ce travail portent sur une exploitation plus importante des potentialités de l'approche en intégrant d'avantage d'informations *a priori* sur l'anatomie cérébrale, les structures d'intérêt et l'apport du clinicien. À plus long terme, nous envisageons de mettre plus d'interactivité entre le système et son utilisateur afin de mieux lier les symptômes cliniques à l'évolution de certains paramètres physiologiques. Ce qui laisse ouvert la question du monitoring des patients épileptiques.

## Références

- S**
- [1] P. CHAUVEL, P. BUSER, J. M. BADIER, *et al.* «La zone épileptogène chez l'homme : représentation des événements inter critiques par cartes spatio-temporelles», *Revue Neurologique*, Vol. 143, pp. 443-450, 1987.
  - [2] F. BARTOLOMEI, P. CHAUVEL, F. WENDLING, «Dynamique des réseaux neuraux dans les épilepsies partielles humaines», *Revue Neurologique*, Vol. 161, pp. 767-780, 2005.
  - [3] F. MORMANN, T. KREUZ, C. RIEKE, R. G. ANDRZEJAK, *et al.* «On the predictability of epileptic seizures», *Clinical Neurophysiology*, Vol. 116, pp. 569-587, 2005.
  - [4] F. WENDLING, M. SHAMSOLLAHI, *et al.*, «Time-frequency matching of warped depth-EEG seizure observations», *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 46, n°5, pp. 601-605, 1999.
  - [5] J. GOTMAN, «L'analyse de l'EEG de Berger à nos jours», *Epileptic Disorders*, Vol. 3, n°3, pp. 7-10, 2001.
  - [6] M.A. BRAZIER, «Spread of seizure discharges in epilepsy: anatomical and electrophysiological consideration», *Exp Neurol*, Vol. 36, pp. 263-72, 1972.
  - [7] J. FERBER, «Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence», *Addison Wesley*, London, 1999.
  - [8] G. WEISS, «Multiagent System. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence», *The MIT Press*, Cambridge, Massachussets (Ed) 1999.
  - [9] L. D. ERMAN, F. HAYES-ROTH, V. R. LESSER *et al.*, «The Hearsay II speech understanding system; Integrating knowledge to resolve uncertainty», *ACM Computing Survey*, Vol. 12, pp. 213-253, 1980.
  - [10] V. R. LESSER, D. CORKILL, «The Distributed Vehicle Monitoring Testbed: A Tool for Investigating Distributed Problem Solving Networks», *AI Magazine*, Vol. 4, n°3, pp. 15-33, 1983.
  - [11] C. E. HEWITT, «Viewing control structures as patterns of passing messages», *Artificial Intelligence*, Vol. 8, pp. 323-364, 1977.
  - [12] M. WOOLDRIDGE, and R. JENNINGS, «Agent theories, architectures, and languages», *Wooldridge, Jennings (ed), Intelligent Agents*, Springer Verlag, pp. 1-22, 1995.
  - [13] E. ALTMAN, T. BASAR, and 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, n°47, pp. 917-930, 2002.
  - [14] J. BANCAUD, «Stereoencephalography. In: Remond A, editor. Handbook of electroencephalography and clinical neurophysiology», *Amsterdam:Elsevier*, vol. 10, pp. 3-65, 1975.
  - [15] J.-P. MULIER, «Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents: Interactions, émergence et systèmes complexes», *Rapport HDR Université Montpellier II*, 2002.
  - [16] A. DROUGOUL, E. RAMAT, «Systèmes multi-agents: vers la conception de systèmes artificiels socio-mimétiques», *actes de JFSMA'2005*, 2005.
  - [17] O. GUTKNECHT, J. FERBER, «Madkit: Une architecture de plateforme multi-agent générique», *Rapport de Recherche*, n° R.R.LIRMM 00061, Université de Montpellier II, 2000.
  - [18] C. GARBAY, «Architectures logicielles et contrôle dans les systèmes de vision. Chapitre du Livre "Les systèmes de vision"», *hermes Paris*, pp. 197-251, 2001.
  - [19] M. NDIAYE, J.-J. MONTAIS, A. KINIE, «Analyse collaborative multi-critères: Application aux signaux électro physiologiques intracérébraux», *GRETSI07*, Troyes 11-14 septembre, 2007.
  - [20] F. BARTOLOMEI, F. WENDLING, *et al.*, «Seizures of temporal lobe epilepsy: identification of subtypes by coherence analysis using stéréo-électro-encephalography», *Clin. Neurophysiol.*, Vol. 10, pp. 1714-1754, 1999.



Mamadou **Ndiaye**

Mamadou Ndiaye a obtenu son diplôme d'Ingénieur de conception en génie électrique à l'École Supérieure Polytechnique (ESP) de Dakar (Sénégal) en 2002, il a obtenu son Master Recherche en Signal Télécommunications Image Radar (STIR) en 2003 et son Doctorat en Traitement du signal et Télécommunications en 2007 à l'Université de Rennes 1 (Rennes, France). Sa thématique de recherche est axée sur la modélisation physiologique centrée sur des pathologies de santé publique (épilepsie) grâce à une association du traitement du signal et une approche multi-agents.



Jean-Jacques **Montois**

Jean-Jacques Montois, ingénieur de formation, est Professeur des Universités à Rennes1-IUT de St Malo. Il développe, et anime depuis de nombreuses années des recherches basées sur l'usage de techniques d'intelligence artificielle coopératives, plus particulièrement les Systèmes Multi-Agents pour la construction d'architectures de commande intelligentes et distribuées. Il a appliqué avec succès ces techniques dans le domaine de la robotique mobile, où les nécessités de contrôle temps réel sont particulièrement critiques. Depuis bientôt 10 ans, J-J. Montois se consacre désormais à l'application des paradigmes SMA dans le cadre du traitement d'images et de signaux médicaux pour des opérations de segmentation et de reconnaissance d'objets.



Abel **Kinié**

Abel Kinié est né le 3 Février 1967 à Nyokon 1 Cameroun. Il a obtenu en 1996 son Doctorat, mention Signal, Télécommunication Image et Radar (STIR) à l'Université de Rennes1. Après un DEA, en 1992. Il est actuellement Enseignant Chercheur à l'IUT de Saint-Malo dans le Département Genie Industriel. Ses travaux de Recherches concernent l'analyse des signaux épileptiques au travers des systèmes multi-agents coopératifs en vue de l'identification de réseaux épileptogène en épilepsie.



