

# Base de données anatomo-fonctionnelle sur le cerveau

Bénédicte Batrancourt<sup>a,b,\*</sup>, Richard Levy<sup>a,b</sup>, Stéphane Lehericy<sup>a,c</sup>, Dominique Hasboun<sup>c</sup>,  
Yves Samson<sup>d</sup>, Ivan Lavallée<sup>e</sup>, Michel Lamure<sup>f</sup>, Bruno Dubois<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Inserm E 007, hôpital de la Salpêtrière, 47, bd de l'Hôpital, 75651 Paris cedex 13, France

<sup>b</sup> Centre de neuropsychologie, hôpital de la Salpêtrière, 47, bd de l'Hôpital, 75651 Paris cedex 13, France

<sup>c</sup> Service de neuroradiologie, hôpital de la Salpêtrière, 47, bd de l'Hôpital, 75651 Paris cedex 13, France

<sup>d</sup> Service des urgences cérébro-vasculaires, hôpital de la Salpêtrière, 47, bd de l'Hôpital, 75651 Paris cedex 13, France

<sup>e</sup> LRIA, université Paris-8, 2, rue de la Liberté, 93200 Saint-Denis, France

<sup>f</sup> LASS, UMR 5823 CNRS, université Claude-Bernard (Lyon-1), bât. 101, 43, bd du 11-Novembre-1918,  
69622 Villeurbanne cedex, France

Reçu le 18 juillet 2001 ; accepté le 13 septembre 2001

Présenté par Michel Thellier

---

**Abstract – An anatomofunctional brain database.** This study proposes a closer look at the neuropsychological method defined as the study of the neural bases of the behavioural and cognitive functions using an organisation–representation model for current data and knowledge of the brain, and the application of an anatomofunctional database. A Centre of Cognitive Anatomy (CAC) was set up for the collection and processing of neuronatomical, neuropsychological, and psycho-behavioural data for patients presenting sequels of focal brain damage. Such a system would allow concurrent treatment of anatomical and functional data. We would expect the results from such a model to produce stable ‘anatomofunctional laws’ that would be independent of all inter-individual variations in the functioning of the brain and could be checked against the entire database of information. A direct application would be the improvement of cognitive and/or behavioural rehabilitation of patients with brain damage. *To cite this article: B. Batrancourt et al., C. R. Biologies 325 (2002) 439–455.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

**brain / anatomy / cognition / behaviour / neuropsychology / modelling / propositional representation / database**

**Résumé –** Ce travail se propose de revisiter la méthode de la neuropsychologie définie comme l'étude des bases neurales des fonctions cognitives et comportementales par l'apport d'un modèle de représentation et d'organisation des données et connaissances actuelles sur le cerveau et la mise en œuvre d'une base de données anatomo-fonctionnelles. Un Centre d'anatomie cognitive (CAC) a été constitué afin de permettre la collection et le traitement des données neuroanatomiques, neuropsychologiques et psychocomportementales auprès des patients présentant des séquelles de lésion cérébrale focale. Un tel système permettra la synthèse des données anatomiques et fonctionnelles. Le résultat attendu du modèle est de produire des « lois anatomo-fonctionnelles » stables et indépendantes de toute variabilité inter-individuelle sur le fonctionnement du cerveau, vérifiables sur l'ensemble des données de la banque. Une application directe serait l'amélioration de la réhabilitation cognitive et/ou comportementale des patients cérébro-lésés. *Pour citer cet article : B. Batrancourt et al., C. R. Biologies 325 (2002) 439–455.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

**cerveau / anatomie / cognition / comportement / neuropsychologie / modélisation / représentation propositionnelle / base de données**

---

\*Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : benedicte.batrancourt@psl.ap-hop-paris.fr (B. Batrancourt).

## Abridged version

### 1. Introduction

This project proposes the elaboration of a representational model and the organisation of today's data and knowledge concerning the brain, in order to assist in the research of functional cognitive and behavioural neural bases in humans. The project proposes to use mathematical model and advanced computer technology, in order to set up an anatomofunctional database allowing the collection and cross-referencing of functional data and data concerning brain anatomy. The aim of the project revisit the existing approach to neuropsychology whilst applying these new technologies wherever they may be beneficial. Neuropsychology can be defined as the study of the neural bases of cognitive and behavioural functions and it is manifest in the traditional problem cerebral localisations. The objective is to integrate into a database: (i) neuroanatomical, neuropsychological and psycho-behavioural data collected amongst patients with brain damage; (ii) current understanding of neuroanatomical, cognitive and psycho-behavioural systems. We postulate that the elaboration of a representational and organisational model of this data and knowledge, if processed mathematically and computerised, applying a knowledge bank would incite the emergence of rules linking the anatomical and functional data. We expect the results of such a model to provide stable 'anatomical–functional laws' that should be independent of all inter-individual variability in the cerebral functioning.

### 2. Method: creation of an anatomical-functional brain database

#### 2.1. The emergence of the 'Brain Mapping' concept

Anatomofunctional Brain Mapping projects have in the last few years considerably progressed, largely since the arrival of technologies and instruments allowing access in vivo to cerebral anatomy and functioning. Each one of these different arrivals brought about an explosion of information and understanding. As a result, it has become difficult for the human mind to integrate the existing knowledge in a global understanding of the brain. One solution to this problem can be sought in *advanced computer technology and information science*. The term 'Brain Mapping' was used for the first time in 1991 by the American Medical Institute. Vast international programmes (e.g. *The Human*

*Brain Project*) have seen the day in the 'Brain Mapping' community. Generally, their objective is to establish a map of all of the structures of the brain and of their functions, without taking individual variations into account. The resulting atlases are probabilist, that is to say, they give the probability at each point in the brain of being in a given structure.

#### 2.2. Originality of the anatomofunctional database system

##### 2.2.1. The anatomo-clinical approach

The understanding of the functional architecture of the brain is generally handled by two complementary approaches: the functional approach in healthy patients and the *anatomo-clinical approach in patients with focal brain damage causing clinical dysfunction*. If functional imagery shows active neuronal networks during specific experimental tasks on the cognitive process being studied, only an analysis of the disturbances generated by circumscribed and clearly anatomically defined brain damage in the same experimental tasks can result in the specification of real functional importance of this area of the brain in the relevant function.

##### 2.2.2. Differential treatment of data and knowledge

The general architecture of the database must differentiate between data and knowledge and take into account the dynamics of the interaction between them. The database establishes highways between each knowledge system, based on the crossover of these systems and their inter-relations.

##### 2.2.3. An anatomofunctional referential

The database treats anatomical data (A) and functional data (F) and generates anatomofunctional type data (A – F). Passing through the knowledge filter the data will be repositioned in a network of anatomofunctional knowledge and hereby form a *synthesis* between the anatomical and functional data: this juxtaposition of anatomofunctional data hereby bringing about the true added value:  $A + F \rightarrow A - F$ .

##### 2.2.4. A propositional representation of data and knowledge

The creation of an anatomofunctional database cannot afford not to have a propositional relational mode of representation. The layout of the propositional representation differs from the analogical representation with regard to the status of the properties. The latter would be intrinsic to analogical representation, whilst they should be extrinsically specified in the elaboration

of the propositional representations. The elementary unit of representation is an abstract proposition expressing the relation between two symbols. The propositional treatment of knowledge hereby allows the elaboration of decomposable representations and specifying the relationships between objects. The knowledge and data bank should be founded upon: (i) the definition, the representation of the most fundamental unit of information in the model, (ii) the elaboration of a model allowing these units to be related to each other and structured.

### 3. Material: The Cognitive Anatomy Centre

At the Pitié-Salpêtrière Hospital, Paris, France, the Centre of Neuropsychology is specialised in the neuropsychological after-effects of brain damage. A Cognitive Anatomy Centre (CAC) has been constituted in order to manage the collection and processing of the neuroanatomical, neuropsychological and psycho-behavioural medical data amongst brain damaged patients.

#### 3.1. Qualification of neuropsychological data

A neuropsychological check-up relies upon the observation and application of objective tests. The analysis of the results is both quantitative (statistical methods) and qualitative (cognitive and behavioural processes). The neuropsychological examination is structured by the main cognitive functions: executive functions, memory, language, attention, arithmetic, logical reasoning, global cognitive efficiency, movements, visuo-spatial function, visuo-perception. In fact, the aim of a neuropsychological examination is not so much to quantify and qualify the main cognitive functions as to quantify and qualify the different elements that make them up. Native data obtained in the neuropsychological tests should lead, via references to cognitive tasks, to elementary cognitive processes, which alone can give a relevant level of information concerning the real cognitive functioning of the subject.

#### 3.2. Qualification of behavioural data

Behaviour is the observable aspect of mental activity. The evaluation has both a quantitative and qualitative dimension. It relies on attribution of scores for behavioural scales. Behavioural problems can accentuate associated cognitive problems and their phenomenological expression is determined by cognitive problems themselves.

#### 3.3. Qualification of neuroanatomical data

The native data result from neuroradiological examinations: Magnetic Resonance Imagery taken in three spatial axes (3D-MRI). The method adopted is the description and the localisation of a cerebral lesion according to three neuroanatomical referentials: sulco-gyral anatomy, Brodmann's cytoarchitectonic areas, and Talairach coordinate system. The damages cerebral entity is not considered in isolation but conserved in a complex anatomical system in which the entities interact with each other.

#### 3.4. Cognitive re-education result of synthesis

The re-education can be considered as the prototype of an anatomofunctional synthesis act. The database should produce relevant elements of synthesis for the re-education project. The re-education should in return provide new information for the database.

### 4. Results: propositional representation of the anatomofunctional model and mathematical treatment

#### 4.1. Structure of the basic element of the model and of the basic components: anatomical (A) and functional (F)

The most unitary element dealt with by the model should be related to all elements of knowledge on the brain; this basic element is termed *brain knowledge element*. These elements of knowledge will be grouped to form the basic components of the model: either anatomical elements (A) or functional elements (F). Each component is identified by a unique indicator. An anatomical element (A) is characterised by  $n$  anatomical properties and can develop  $m$  anatomical relationships with other anatomical components. The whole of these anatomical components and their inter-relationships constitute an *anatomical network* (R(A,A)). A functional element (F) is characterised by  $n$  functional properties and can establish  $m$  relationships with other functional components. The whole of these functional components and their inter-relationships constitute a *functional network* (R(F,F)). The most accomplished architecture in the model is found through its capacity to establish inter-network links based on the anatomofunctional rules; these rules allow the expression of anatomofunctional knowledge. An anatomo-

functional rule ( $A + F \rightarrow A - F$ ) permits anatomofunctional link to be made between an anatomical component and a functional component and generates a synthetic component ( $A - F$ ), which has access to each one of the two networks; thus the junctions between the two networks represent an anatomofunctional network in themselves.

## 4.2. The anatomical and functional networks

The current knowledge makes it possible to establish different types of relationships between components of the same 'nature'. The anatomical relationships are essentially descriptive and correspond to a grouping of sub-groups of elements according to the principal types of organisation of the central nervous system: cortical, histological, chemical, connecting. In the understanding of brain functioning, said to be 'connectivist', there is an attempt to associate each brain function a global activity of a network of localised modules. A functional model consists in the definition of elementary processes, each one being responsible for a part of the global functioning process, then in the connection of these modules by functional relationship. The propositional representation must extrinsically specify the intra-network relationships that each one ( $A$  or  $F$ ) has with other elements of the same nature: ( $R(A,A)$  or  $R(F,F)$ ). These networks will be represented and processed thanks to the mathematical functions of the graphs.

## 4.3. The anatomofunctional network

The propositional treatment should specify the inter-network and express the structure of an anatomofunctional synthesis element according to the formula:  $A + F \rightarrow A - F$ , as well as the different types of rules that bring about the synthesis. The anatomical–functional rules are obtained by (1) the paradigms of the lesion, (2) the functional imagery paradigms. The rules can be categorised as (i) positive expression (when the anatomical component  $A$  is destroyed only then function  $F$  is always impaired), (ii) negative expression (when the anatomical component  $A$  is preserved, then the function  $F$  is unchanged), (iii) weighing-up rules that help us to judge the importance of the anatomical entity  $A$  in the expression of the function  $F$ .

## 5. Discussion

The results obtained demonstrate the feasibility of such a representational model of knowledge and anatomofunctional data on the brain. The best result we can expect from this instrument of artificial intelligence is a capability to create new anatomofunctional rules. The first anatomofunctional rules will be established by specialists. If using these rules as a starting point, as the new data and knowledge are collected and integrated into the system, stable 'anatomical–functional laws' are created, taking into account both inter-individual variation when cross-checked against the entire database, then it can be said that the system is operational.

## 1. Introduction

Ce travail se propose d'élaborer un modèle de représentation et d'organisation des données et connaissances actuelles sur le cerveau, afin d'aider à la recherche des bases neurales des fonctions cognitives et comportementales chez l'homme. Il s'agit d'utiliser la modélisation mathématique et les technologies avancées de l'informatique, afin de mettre en œuvre une base de données anatomo-fonctionnelles permettant le recueil et de la mise en corrélation des données fonctionnelles et des données anatomiques cérébrales. Le projet est de mettre à profit ces technologies nouvelles pour revisiter l'approche neuropsychologique. À la différence des sciences cognitives, qui s'intéressent à l'architecture théorique des processus qui sous-tendent la cognition et le comportement, sans référence à leur substratum neurobiologique, la neuropsychologie se définit comme l'étude des bases neurales

des fonctions cognitives et comportementales : « la neuropsychologie peut se présenter comme une synthèse critique d'un ensemble de disciplines diverses dont les rapprochements permettent, à un certain étage de la réflexion, d'aboutir à quelque compréhension du comportement. Elle se manifeste dans la tradition du problème des localisations cérébrales. La méthode de la neuropsychologie consiste à déterminer si, à une étape définie des connaissances, peut ou non se dégager un modèle du fonctionnement cérébral, qui retienne le maximum d'informations positives et ne renferme pas de contradiction » [1].

Considérant la quantité importante des données et connaissances acquises dans les domaines de l'anatomie du système nerveux central et des fonctions cognitivo-comportementales, nous faisons l'hypothèse selon laquelle une solution au besoin d'intégration de ces données pourrait être apportée par la mise en œuvre d'un outil informatique. L'objectif scientifique du pro-

jet consiste à intégrer dans une banque de connaissances : (1) les données neuroanatomiques, neuropsychologiques et psychocomportementales recueillies auprès des patients cérébro-lésés ; (2) les connaissances actuelles sur les systèmes neuroanatomiques, cognitifs et psychocomportementaux. Nous postulons que l'élaboration d'un modèle de représentation et d'organisation des données et connaissances, son abstraction par l'expression mathématique et sa mise en œuvre informatique par une banque de connaissances permettront d'exprimer des règles de liaison entre les composants anatomiques et fonctionnels. Ces liaisons génèrent des composants de synthèse qui possèdent une entrée sur chacun des deux réseaux : anatomique et fonctionnel. Le résultat attendu d'un tel modèle est de produire des « lois anatomo-fonctionnelles » stables et indépendantes de toute variabilité inter-individuelle sur le fonctionnement du cerveau, vérifiables sur l'ensemble des données de la banque de données. La mise en œuvre informatique fondée sur le modèle mathématique serait alors capable de manipuler des éléments de synthèse et ainsi d'aider à intégrer les bases neurales des fonctions cognitives. Une application directe serait l'amélioration de la réhabilitation cognitive et/ou comportementale des patients cérébro-lésés.

## 2. Méthode : création d'une banque de données anatomo-fonctionnelles

### 2.1. Émergence du concept de *Brain Mapping*

La compréhension du fonctionnement du cerveau requiert l'intégration de l'information à différentes échelles : depuis le gène, en passant par la molécule, la synapse, les circuits neuronaux, jusqu'à celle des grands systèmes fonctionnels (reconnaissance visuelle, programmation motrice, planification comportementale...). Les projets de cartographie anatomo-fonctionnelle du cerveau (*Brain Mapping*) ont au cours de ces dernières années pris un essor considérable, car on dispose maintenant de modalités permettant d'accéder in vivo à l'anatomie et au fonctionnement du cerveau. À chacun de ces divers niveaux, s'est produite une explosion de l'information et des connaissances. En conséquence, il est devenu difficile, pour l'esprit humain, d'intégrer ces connaissances dans une vue globale du cerveau. Une solution à ce problème est apportée par les technologies avancées de l'informatique et les sciences de l'information. Le concept du *Brain Mapping* [2] est cité pour la première fois en 1991 par l'Institut de médecine américain. Il signifie la rencontre entre, d'une part, les besoins de traitement des données dans les programmes de recherche sur le cerveau et, d'autre part, l'émergence

de moyens importants d'acquisition et de traitement informatique des données numérisées.

### 2.2. Objectifs et travaux scientifiques de la communauté du *Brain Mapping*

De vastes programmes internationaux (exemple : *The Human Brain Project*) ont vu le jour dans la communauté du *Brain Mapping*. De façon générale, leur objectif est de dresser la carte de la totalité des structures du cerveau et de leurs fonctions, en s'affranchissant des variations individuelles. Les atlas établis sont probabilistes, c'est-à-dire qu'ils donnent la probabilité à chaque point du cerveau de se trouver dans une structure donnée. Les axes d'exploration scientifique s'intéressent aux dimensions spatiale, statistique, génétique, fonctionnelle, connectique, temporelle, chimique, pathologique du vieillissement. Les projets du *Brain Mapping* développent principalement : (1) des algorithmes de traitement d'image, afin d'intégrer dans l'atlas l'information fonctionnelle obtenue en IRMf et PET, sous forme d'une cartographie fonctionnelle ; (2) des batteries de tâches cognitives, des paradigmes expérimentaux, afin d'obtenir une cartographie fonctionnelle en fonction du sujet et de la modalité ; (3) des outils neuroinformatiques statistiques, afin d'analyser l'ensemble de toutes ces données structurées ; (4) des bases de données permettant le recueil des données et des méthodes d'interrogation multi-attributs.

### 2.3. Originalité du système de base de données anatomo-fonctionnelles

#### 2.3.1. La nature des données : l'approche anatomo-clinique

D'une façon générale, la connaissance de l'architecture fonctionnelle du cerveau passe par deux approches complémentaires : approche fonctionnelle chez le sujet sain et *approche anatomo-clinique chez le patient atteint de lésion focale et limitée du cerveau*. L'approche « anatomo-clinique » s'applique à tout patient qui présente une lésion focale et bien limitée du cerveau, responsable de dysfonctionnements exprimés en clinique. Cette approche est complémentaire de l'approche fonctionnelle. Si l'imagerie fonctionnelle visualise les réseaux neuronaux activés au cours de paradigmes expérimentaux spécifiques du processus cognitif étudié, seule l'analyse des perturbations produites par une lésion cérébrale circonscrite et anatomiquement bien définie dans les mêmes paradigmes expérimentaux permet de préciser l'importance fonctionnelle réelle de cette aire cérébrale dans la fonction considérée.

### 2.3.2. La gestion différenciée entre données et connaissances

Chaque expert réalise en permanence un va-et-vient intellectuel entre l'observation, les données du patient et les connaissances théoriques qu'il possède. L'architecture générale de la base de données doit rendre compte de ces deux niveaux (les données, les connaissances) et de la dynamique de cette interaction entre données et connaissances. La base de données que nous souhaitons mettre en œuvre doit être à deux niveaux : le premier est constitué par des données « patients » et le second tient aux connaissances des experts dans ces différents systèmes : cognitif, neuroanatomique et psychocomportemental. La base de données établit des voies de passage entre chaque système de connaissance, qui tiennent à leurs inter-relations : liens établis entre la cognition et la neuroanatomie, liens établis entre le psychocomportement et la cognition, liens établis entre le psychocomportement et la neuroanatomie. La Fig. 1 représente la macro-structure de la base de données, avec ses deux niveaux.

### 2.3.3. La recherche d'un référentiel anatomo-fonctionnel

La base de données manipule des données anatomiques (A), des données fonctionnelles (F) et produit des données de type « anatomo-fonctionnel » (A-F). En passant par le filtre des connaissances (représenté par chacune des boîtes dans la Fig. 1), les données vont être repositionnées dans un réseau de connaissances anatomo-fonctionnelles et ainsi produire une *synthèse*

entre des données anatomiques et des données fonctionnelles, réalisant la valeur ajoutée de cette juxtaposition des données anatomo-fonctionnelles. Ceci est illustré par la formule :  $A + F \rightarrow A - F$ . En retour, les approches systémiques (exemple : l'approche cognitive) pourront tirer profit de la confrontation des modèles théoriques aux données de la pathologie cérébrale, qui permettront de confirmer ou de revisiter des connaissances acquises.

### 2.3.4. Un mode de représentation propositionnelle des données et des connaissances

La création d'une banque de données anatomo-fonctionnelles ne peut faire l'économie du passage d'un mode de représentation analogique de l'information à un mode de représentation propositionnelle et relationnelle et, par conséquent, d'une description du format de l'information représentée. La forme de représentation propositionnelle diffère de la forme de représentation analogique du point de vue du statut des propriétés. Ces dernières seraient intrinsèques aux représentations analogiques, tandis qu'elles devraient être spécifiées de façon extrinsèque dans l'élaboration des représentations propositionnelles [3] : « leur élaboration suppose que certaines caractéristiques des objets soient d'abord isolées et que les représentations entre les symboles qui les représentent soient ensuite spécifiées de façon extrinsèque à ces symboles. L'unité élémentaire de la représentation est une proposition abstraite, exprimant une relation entre deux symboles. La correspondance entre la représentation et le référent ne repose sur aucun

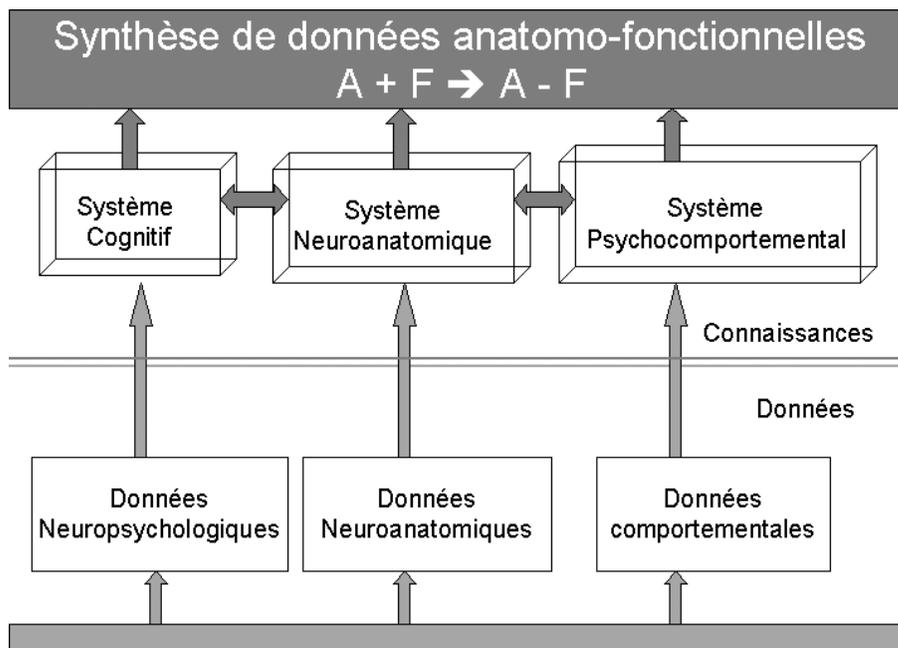


Fig. 1. Macrostructure de la base de données.

isomorphisme, elle est arbitraire » [4]. Le traitement propositionnel des connaissances permet donc d'élaborer des représentations décomposables, en isolant les propriétés pertinentes de celles qui ne le sont pas et en spécifiant les relations vérifiables entre les objets. La banque de connaissances et de données doit pouvoir s'appuyer sur : (1) la définition, la représentation de l'élément d'information le plus unitaire du modèle ; (2) l'élaboration d'un modèle d'articulation et d'organisation de ces éléments unitaires entre eux.

### 3. Matériel : le Centre d'anatomie cognitive

Pour ce projet de synthèse anatomo-fonctionnelle, il faut disposer d'une banque de données anatomo-fonctionnelles résultant de lésions cérébrales. À l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris), le Centre de neuropsychologie est spécialisé dans le bilan des séquelles neuropsychologiques des lésions cérébrales. La reconstruction du siège anatomique précis de la lésion responsable est maintenant possible à partir d'images acquises en IRM-3D. Un Centre d'anatomie cognitive (CAC) a été constitué afin de réaliser ce travail de collection et de traitement des données médicales neuroanatomiques, neuropsychologiques et psychocomportementales auprès des patients cérébro-lésés. Le CAC permet de mieux interpréter les désordres produits par ces lésions, d'en apprécier le pronostic et de définir la stratégie optimale en termes de rééducation fonctionnelle. C'est aussi le point de départ pour l'acquisition des données natives nécessaires au projet de synthèse anatomo-fonctionnelle. Les données natives sont rassemblées pour chaque patient et structurées dans un dossier patient. Les grands types de données retenus sont : les données générales (latéralité, étiologie de la lésion, plainte principale) ; les données neuropsychologiques ; les données psychocomportementales ; les données neuroanatomiques ; des éléments sur le suivi et la rééducation entreprise par le patient ; des références de la littérature en rapport avec le cas clinique. À ce jour, 34 dossiers patients ont été créés à partir de ce modèle type. La partie la plus intégrée de chacun des dossiers est l'effort de synthèse anatomo-fonctionnelle (mise en relation des déficits cognitifs induits par la lésion cérébrale et son siège précis) réalisé par un expert après chaque constitution de dossier. La Fig. 2 présente la feuille de synthèse pour un dossier patient. Le Tableau 1 présente un résumé de 29 dossiers patients enregistrés dans la base de données. À ce niveau de l'étude, l'expert dispose des données suffisantes pour mener un travail de synthèse anatomo-fonctionnelle pour un patient. Pour un ensem-

ble de patients, il faut positionner l'ensemble des données sur un référentiel anatomo-fonctionnel qui puisse aider à la synthèse anatomo-fonctionnelle pour  $n$  patients. Pour cela, il faut étudier la nature des données collectées. Les méthodes de recueil des données neuroanatomiques, neuropsychologiques et psychocomportementales sont indirectes, le problème pour chacun de ces types de données étant de définir le niveau de description pertinent.

#### 3.1. Qualification des données neuropsychologiques : passer du test aux processus cognitifs élémentaires

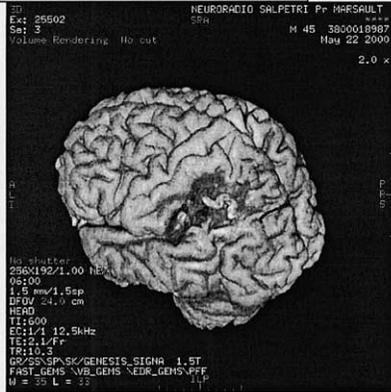
Un bilan neuropsychologique s'appuie sur l'observation et l'utilisation d'épreuves objectives, choisies par le psychologue en fonction de la sémiologie présentée par le patient. La performance dépend de la nature des épreuves utilisées, mais son analyse comporte une dimension quantitative (méthode statistique) et qualitative (processus cognitifs, comportements). Le bilan neuropsychologique constitue la donnée native. Il possède une forme générale, similaire d'un patient à l'autre. Le bilan est structuré par la liste des fonctions cognitives évaluées (fonctions exécutives, langage, calcul, praxies, fonctions visuo-spatiales, mémoire...). À chacune des fonctions correspond une liste de tests ainsi que la performance normale des sujets témoins et celle obtenue par le patient étudié. En fait, le bilan neuropsychologique n'a pas pour objectif de quantifier et qualifier ces grandes fonctions cognitives, mais les différentes composantes qui les constituent. Par exemple, la fonction « mémoire » est évaluée au travers de ses différentes sous-unités : mémoire épisodique, mémoire à long terme, mémoire à court terme, mémoire procédurale ; de même, le « langage » peut être évalué dans sa modalité écrite et parlée et peut être qualifié sur le versant réceptif (compréhension) ou expressif (production verbale). Deux bilans peuvent se différencier par la liste des épreuves choisies pour explorer une même fonction. Pour évaluer un même aspect de la fonction, le psychologue dispose en effet de tests différents. Prenons l'exemple de la mémoire : le patient Pca1 a passé les tests de l'apprentissage sélectif de Grober et Buschke et l'échelle de Wechsler « mémoire révisée », alors que le patient Pca2 a passé les tests « apprentissage verbal de Californie » et l'apprentissage sélectif de Grober et Buschke. Pour placer les données dans un même référentiel, il faut connaître les variables mesurées pour chaque test, ce qui revient à passer du concept de test au concept de tâche cognitive. Dans ce but, nous avons établi une liste exhaustive des tests neuropsychologiques utilisés au Centre de neuropsychologie et défini pour chacun d'entre eux les sous-tests, les variables mesurées et surtout les fonc-

## Conclusions

### Conclusion neuropsychologique

Le patient présente une aphasie de conduction sur les arguments suivants : (1) des transformations phonémiques ; (2) un manque du mot ; (3) un trouble majeur de la répétition ; (4) une fluence conservée avec un discours peu informatif ; (5) un trouble du maintien en mémoire à court-terme du matériel verbal. Il existe aussi des troubles dépassant le cadre syndromique de l'aphasie de conduction en présence de troubles de la compréhension et d'une agraphe sévère.

### Conclusion anatomique



Volume Analysis – Voxtool 3.03 – G.E. Medical Systems

La lésion implique principalement le lobule pariétal inférieur gauche (le gyrus supramarginal, BA 40, et la partie antérieure du gyrus angulaire, BA 39). Elle englobe le sillon intrapariétal.

Il existe une extension de la lésion vers la première circonvolution temporale, avec une atteinte de l'aire de Wernicke (BA 22)

BA = Brodmann

### Synthèse

1. Le patient présente une aphasie de conduction par lésion interrompant le faisceau arcué, probablement en regard du gyrus supramarginal. Doit être intégré à l'aphasie de conduction, le trouble de la mémoire à court-terme pour le matériel verbal (probablement dysconnexion de la boucle phonologique de la mémoire de travail, voir références).
2. Les troubles initiaux de la compréhension peuvent correspondre à l'atteinte de l'aire de Wernicke, tandis que l'agraphie est en relation avec l'atteinte du gyrus angulaire.
3. Nous suggérons la poursuite de la rééducation de l'aphasie (qui semble avoir donné de bons résultats) en insistant sur les techniques de rééducation suivantes : analyse perceptive auditive (segmentation phonologique), traitement sémantique, traitement lexical et traitement post-lexical (accès à la forme), méthode des codes de B. Ducarne.

Dr Richard Lévy

Fig. 2. Feuille de synthèse pour un dossier patient. Dossier type produit à l'issue d'un staff CAC (Centre d'anatomie cognitive). La synthèse anatomo-fonctionnelle est réalisée pour un patient, par un expert.

tions cognitives élémentaires évaluées permettant de définir une liste de dysfonctionnement ou symptômes à partir de valeurs seuils ou des scores pathologiques. Onze secteurs (ou fonctions) cognitifs ont été retenus : fonctions exécutives ; mémoire épisodique ; mémoire sémantique ; langage ; attention ; calcul ; raisonnement ; efficacité cognitive globale ; gestes ; fonctions visuo-spatiales, visuo-perception. Les caractéristiques pour 209 tests ou sous-tests et les variables qu'ils mesurent ont été définis : étalonnage du test ; influence de différents facteurs (âge, sexe, niveau culturel) ; seuil pathologique. Un arbre de décision pour décrire en pratique l'expérience clinique a été proposé concernant le choix des tests neuropsychologiques pour les 11 secteurs cognitifs retenus. Ainsi, à titre d'exemple, l'épreuve Grober et Buschke est associée à la tâche « mémoire épisodique à long terme dans sa modalité verbale »

(Fig. 3) ; le sous-test « rappel indicé immédiat » du Grober et Buschke est, quant à lui, associé à la tâche « mémoire épisodique à court terme dans sa modalité verbale ». Il reste alors à circonscrire les processus cognitifs élémentaires qui sous-tendent les tâches cognitives que nous avons définies a priori. Reprenons l'exemple de la mémoire : il faudrait arriver à qualifier le processus élémentaire de maintien d'une information verbale dans la boucle phonologique et le processus de traitement ou de manipulation dans le processeur central exécutif central mis en œuvre par le patient au cours d'une tâche cognitive faisant appel à la mémoire de travail verbale. Tel est le cheminement des données neuropsychologiques : les données natives, issues des performances obtenues aux tests neuropsychologiques, doivent conduire, en passant par la référence aux tâches cognitives, aux processus cognitifs élémentaires, les

Tableau 1. Tableau résumé de 29 dossiers patients enregistrés dans la banque de données CAC.

ID CAC	Déficit neuropsychologique	Siège de la lésion	Hémisphère	Étiologie
Pca1	Syndrome frontal, déshinhibition, impulsivité	Cortico-sous-cortical bi-latéral. Lobe Fronto-pariéto-occipital	Droit, gauche	TC avec hématome
Pca2	Syndrome frontal, collectionnisme	Lobe frontal bi-latéral	Droit, gauche	Méningiome
Pca3	Alexie agnosique	Lobe occipital	Gauche	MAV
Pca4	Syndrome frontal, mémoire de travail verbale	Lobe frontal	Gauche	AVC i
Pca5	Syndrome frontal, mémoire de travail verbale	Lobe frontal	Droit	AVC i
Pca6	PAP	Pas d'anomalie visible		Anoxie
Pca7	Syndrome dysexécutif. Rappel.	Sous-cortical–capsulo-strié	Gauche	AVC i
Pca8	Imagerie mentale, intégration auditivo-spatiale	Lobe occipital	Gauche	AVC i
Pca9	Aphasie de Broca	Lobe frontal	Gauche	Anévrisme
Pca10	Attention et de mémoire de travail	Pas d'anomalie visible		Syndrome de Sheehan
Pca11	Conceptualisation, compréhension syntaxique	Fronto-médian	Gauche	AVC i
PCA12	Agnosie visuelle, mémoire verbale	Lobe occipital, thalamus	Gauche	AVC i
Pca13	Aphasie de Broca, syndrome frontal : rappel, contrôle attentionnel, conceptualisation	Lobe fronto-temporal	Gauche	TC avec contusion
Pca14	Hémi-négligence gauche	Fronto-pariétal	Droit	AVC i
Pca16	Syndrome frontal : rappel, élaboration conceptuelle, apathie	Sous-cortical - capsulo-strié	Droit	AVC i
Pca17	Aphasie de Broca, syndrome frontal : rappel, conceptualisation verbale, contrôle inhibiteur	Lobe frontal	Gauche	AVC i
Pca18	Aphasie mixte dyslexie–alculie	Lobe temporo-pariétal	Gauche	MAV
Pca19	Aphasie de conduction, mémoire de travail verbale	Lobe pariétal	Gauche	AVC i
Pca20	Aphasie de Wernicke réduite	Sous-cortical striato-frontal	Gauche	AVC i
Pca21	Syndrome dysexécutif, aalculie	Lobe pariétal	Gauche	AVC i
Pca22	Dénomination des couleurs et des noms propres, sans agnosie.	Lobe occipital	Gauche	AVC i
Pca24	Mémoire antérograde avec confabulations. Mémoire épisodique et accès aux noms propres. Syndrome dysexécutif. Orientation topographique.	Lobe limbique	Gauche	AVC i
Pca25	Hémi-négligence spatiale gauche Mémoire à court terme visuo-spatiale	Lobe pariétal	Droit	AVC h
PCA26	Syndrome de Gerstmann. Dyslexie, compréhension orale.	Carrefour TPO	Gauche	AVC i
PCA27	Syndrome frontal : mémoire de travail visuelle et verbale. Rappel, conceptualisation, inhibition.	Carrefour TPO	Gauche	AVC i
PCA28	Aphasie globale. Hémi-négligence spatiale droite. Apraxie gestuelle.	Carrefour TPO	Gauche	AVC i
PCA29	Syndrome frontal PAP	Sous-cortical–striato-pallidal bi-latéral	Droit, gauche	Anoxie
PCA30	Aphasie motrice. Agraphie. Mémoire de travail multi-modalités. Inertie intellectuelle.	Lobe frontal	Gauche	AVC i
PCA31	Syndrome frontal	Sous-cortical–capsulo-thalamique bilatéral		AVC i

seuls à donner le niveau pertinent d'information quant au fonctionnement cognitif réel du sujet.

### 3.2. Qualification des données comportementales

Le comportement correspond à la partie observable de l'activité mentale. L'évaluation comporte une dimension quantitative et une dimension qualitative. Elle repose sur la cotation d'échelles au cours d'entretiens avec le patient et/ou son aidant principal ou sa famille. Les échelles comportementales évaluent quantitative-

ment le comportement du patient, mais elles impliquent le jugement de l'observateur qui fait la cotation. Cette composante d'interprétation peut rendre difficile la comparaison inter-individuelle et l'inclusion de ces données dans un référentiel. Ces données doivent cependant être introduites parmi les données fonctionnelles de la base de connaissances, car elles sont liées à l'anatomie et à la cognition. « Les troubles comportementaux peuvent majorer les troubles cognitifs associés, et leur expression phénoménologique est détermi-

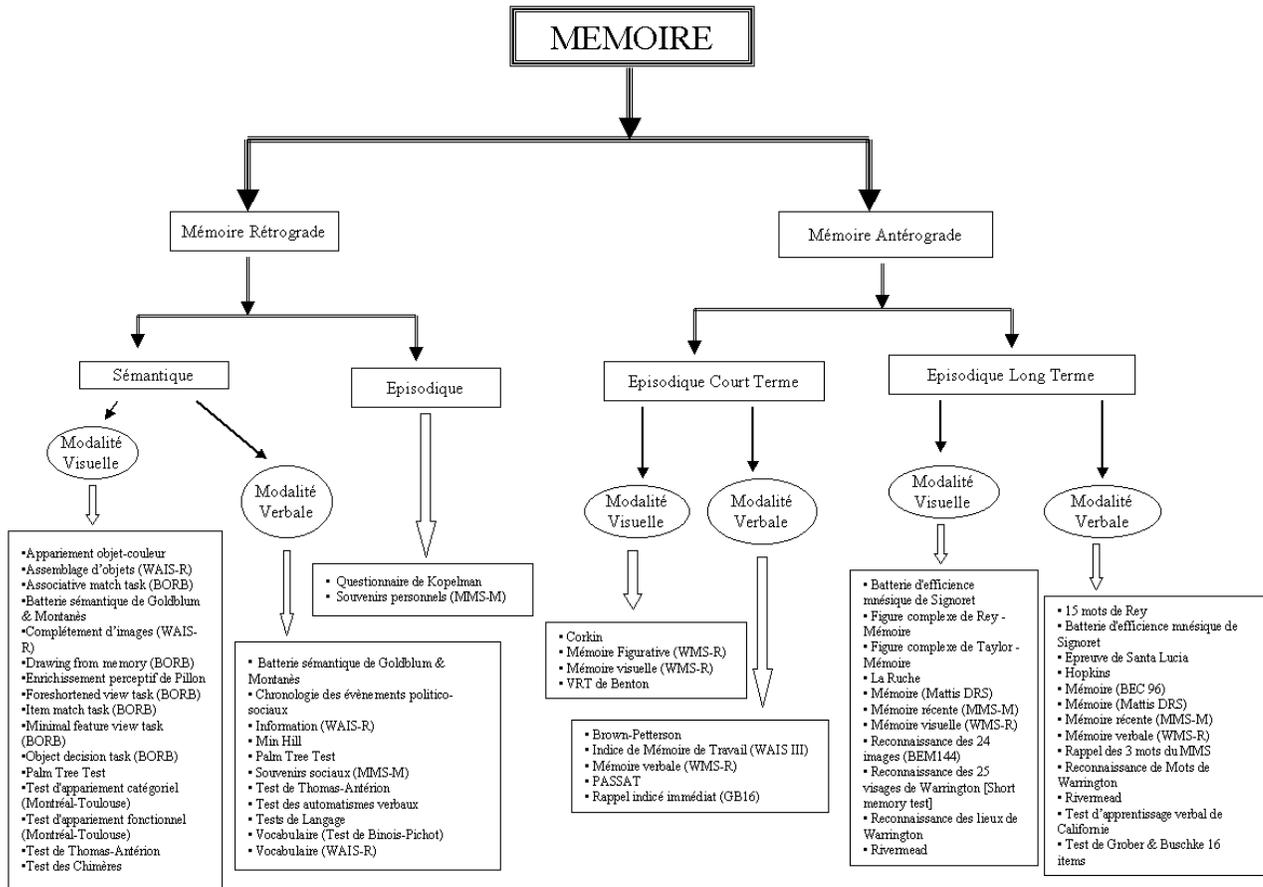


Fig. 3. Épreuve Grober et Buschke associée à la mémoire épisodique à court terme dans sa modalité verbale.

née par les troubles cognitifs eux-mêmes » [5]. Comme pour les données neuropsychologiques, nous avons entrepris l'inventaire exhaustif des échelles comportementales utilisées au Centre de neuropsychologie et défini pour chacune d'entre elles le mode d'évaluation, la source d'information, la nature de la cotation, les propriétés métrologiques (validité, sensibilité) et surtout les domaines comportementaux explorés permettant de définir de façon objective une liste de troubles du comportement à partir de valeurs seuils ou données pathologiques. Seize échelles ont été étudiées et 34 domaines comportementaux isolés.

### 3.3. Qualification des données neuroanatomiques : passer de la localisation de la lésion cérébrale au système cérébral concerné par la lésion

Les données natives sont issues d'examen neuroanatomiques : imagerie par résonance magnétique acquies dans les trois plans de l'espace (IRM-3D). L'objectif ici est de localiser une lésion cérébrale du cortex cérébral ou des noyaux gris centraux et de l'exprimer dans un référentiel neuroanatomique. La démarche adoptée est la suivante : (1) description de la lésion à

partir de l'analyse des images 2D (axiales, sagittales et coronales) ; (2) reconstruction en trois dimensions de l'encéphale et de la lésion, grâce à un logiciel de traitement d'images (*Volume Analysis*, GE) ; (3) lecture de la localisation anatomique à partir de ces représentations 3D, selon trois référentiels anatomiques possibles—l'anatomie sulco-gyrale, en utilisant la nomenclature de la *Neuronames Brain Hierarchy* (environ 800 entités cérébrales référencées, anglais, latin et synonymes) [6], les aires cytoarchitectoniques de Brodmann [7] et les coordonnées  $x, y, z$  dans le référentiel de Talairach [8], en définissant les limites de la lésion par celles d'un parallélépipède qui l'engloberait avec un gradient antéro-postérieur, inféro-supérieur et latéro-médian. On ajoute à la description anatomique le calcul du volume de l'encéphale et de celui de la lésion. L'entité cérébrale lésée n'est pas considérée comme isolée, mais est replacée dans un système anatomique complexe dans lequel les entités interagissent les une avec les autres. Il faut pour cela considérer le système anatomique comme un ensemble d'éléments et effectuer des regroupements de sous-ensembles d'éléments selon les principaux types connus de l'organisation du

système nerveux central : connectivité établie sur la base des liaisons anatomiques intracorticales, d'une complémentarité histologique, neurochimique ou hodo-logique, selon les connaissances de la neuroanatomie fonctionnelle. Le modèle doit définir l'ensemble des sous-ensembles et les types de relations qui donnent une validité à ces regroupements d'éléments.

### 3.4. La rééducation cognitive, produit de la synthèse

La rééducation du handicap cognitif et/ou comportemental peut être considéré comme le produit de la synthèse anatomo-fonctionnelle. Le thérapeute stimule les fonctions cognitives du patient, stimuli qui activent des réseaux neuronaux encore fonctionnels. La stimulation modifie les entités anatomiques, puisqu'elle induit une stabilisation de la performance dans le temps. Parallèlement, l'évolution des conséquences anatomiques, directe ou indirecte, de la lésion favorise des progrès fonctionnels orientés par la rééducation. La rééducation peut-être alors considérée comme un prototype d'une action de synthèse anatomo-fonctionnelle. La base de données doit produire des éléments de synthèse utiles pour le projet de rééducation. Les éléments de rééducation doivent en retour apporter de nouvelles connaissances à la banque de données.

## 4. Résultats

### 4.1. Représentation propositionnelle du modèle anatomo-fonctionnel

L'élément le plus unitaire manipulé par le modèle doit correspondre à tout élément de connaissance du cerveau ; cet élément de base du modèle est appelé « élément de connaissance du cerveau ». Le terme « connaissance » recouvre ici aussi bien les données accumulées sur le cerveau que les connaissances organisées actuelles sur le cerveau. Ces éléments de connaissance vont être regroupés entre eux pour former les composants de base du modèle. Ces composants de base sont soit des composants anatomiques (A), soit des composants fonctionnels (F). Chaque composant est repéré par un identifiant unique. Un composant anatomique peut établir des relations anatomiques avec d'autres composants anatomiques. L'ensemble de ces composants anatomiques et de leurs relations constitue le « réseau anatomique » (R(A,A)). Un composant fonctionnel peut établir des relations fonctionnelles avec d'autres composants fonctionnels. L'ensemble de ces composants fonctionnels et de leurs relations constituent le « réseau fonctionnel » (R(F,F)). L'architecture la plus accomplie du modèle provient de la faculté

d'établissement de liaisons inter-réseaux basées sur les règles anatomo-fonctionnelles ; ces règles expriment les connaissances anatomo-fonctionnelles. Une règle anatomo-fonctionnelle permet d'établir une liaison anatomo-fonctionnelle entre un composant anatomique et un composant fonctionnel ( $A + F \rightarrow A - F$ ). Cette liaison génère un composant de synthèse ( $A - F$ ) qui possède une entrée sur chacun des deux réseaux. Le réseau anatomique, le réseau fonctionnel ainsi que les points de jonction entre les deux réseaux constituent le réseau anatomo-fonctionnel.

#### 4.1.1. Définition de la structure de l'élément de base du modèle

Dans la représentation propositionnelle, l'élément de base se présente sous la forme d'une structure de base à quatre champs (Fig. 4). Le premier champ de la structure est obligatoire. Il indique la nature de l'élément : D introduit une définition, P une propriété, R une relation entre deux composants de même nature (anatomique ou fonctionnel), L une liaison anatomo-fonctionnelle entre deux éléments de nature différente, selon une règle anatomo-fonctionnelle. Le deuxième champ contient la connaissance et/ou les données sur le cerveau à introduire dans le modèle. Le modèle doit connaître la *source* de chaque élément de connaissance pour contrôler l'exploitation des connaissances apportées par différentes disciplines (exemple : certaines structures cérébrales gardent le même nom d'une espèce à l'autre, tout en présentant des différences, ou encore les maladies du système nerveux central chez l'homme ne réalisent jamais l'équivalent des ablations ou destructions expérimentales de régions cérébrales chez l'animal). Les troisième et quatrième champs renseignent sur le moyen d'apport de la connaissance (études neurophysiologiques, neuroanatomie, corrélations anatomo-cliniques, analyses systématiques sur des séries importantes, études en imagerie fonctionnelle chez l'homme, expérimentation sur l'animal...), ainsi que sur les références bibliographiques. Ces éléments de connaissance vont être regroupés entre eux pour former les composants de base du modèle. Ces composants de base sont, soit des éléments anatomiques (A), soit des éléments fonctionnels (F).

#### 4.1.2. Définition de la structure des composants de base du modèle

##### 4.1.2.1. Représentation propositionnelle de l'élément anatomique (A)

Un élément anatomique (A) sera défini par un identifiant unique. Un élément anatomique est caractérisé par  $n$  propriétés anatomiques. Un élément anatomique possède  $m$  relations anatomiques avec d'autres élé-

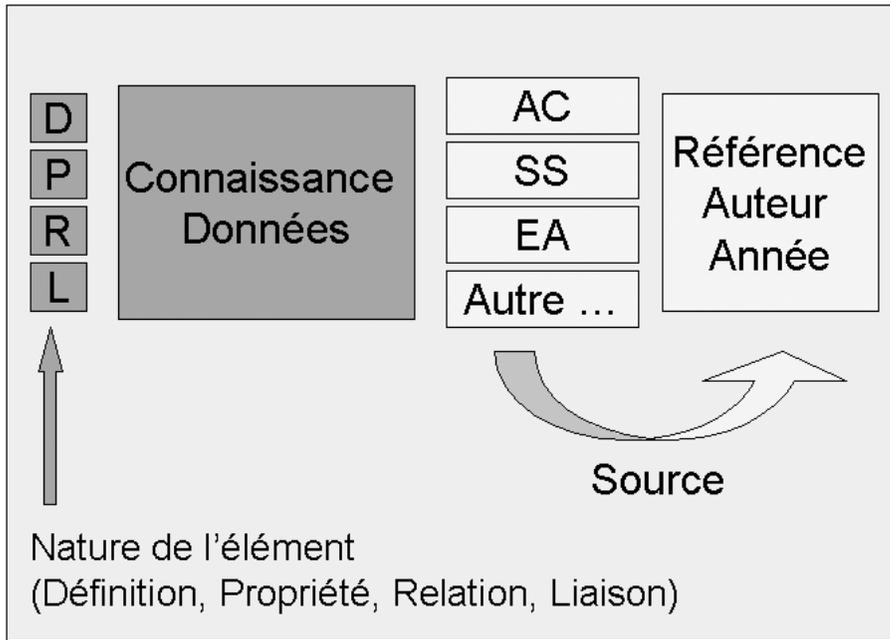


Fig. 4. Structure d'un élément de connaissance.

ments anatomiques, de voisinage ou à distance. L'ensemble de ces éléments anatomiques et de leurs relations constituent le réseau anatomique. Un élément anatomique possède  $p$  liaisons anatomo-fonctionnelles avec des éléments fonctionnels, liaisons mises en place selon les règles anatomo-fonctionnelles exprimées dans la base de connaissances. La Fig. 5 présente la structure d'un élément anatomique.

#### 4.1.2.2. Représentation propositionnelle de l'élément fonctionnel (F)

Un élément fonctionnel (F) sera défini par un identifiant unique. Un élément fonctionnel est caractérisé par  $n$  propriétés fonctionnelles. Un élément fonctionnel possède  $m$  relations fonctionnelles avec d'autres éléments fonctionnels. L'ensemble de ces éléments fonctionnels et de leurs relations constituent le réseau fonctionnel. Un élément fonctionnel possède  $p$  liaisons anatomo-fonctionnelles avec des éléments anatomiques ; ces liaisons sont mises en place selon les règles anatomo-fonctionnelles exprimées dans la base de connaissances. La Fig. 5 présente la structure d'un élément fonctionnel.

#### 4.1.3. Représentation propositionnelle et traitement mathématique du réseau anatomique et du réseau fonctionnel

Les connaissances actuelles permettent d'établir des relations de différents types entre composants de même

nature. L'ensemble des éléments anatomiques et de leurs relations constituent le réseau anatomique, l'ensemble des éléments fonctionnels et de leurs relations constituent le réseau fonctionnel. La représentation propositionnelle doit spécifier de façon extrinsèque les relations intra-réseau que chaque élément (A ou F) possède avec d'autres éléments de même nature : (R(A,A) ou R(F,F)). Ces réseaux seront représentés et traités grâce aux fonctions mathématiques des graphes (Fig. 6) et des matrices associées aux graphes. Un graphe est un schéma constitué par un ensemble de points  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , et par un ensemble de flèches reliant chacun de ceux-ci. Les points sont appelés les sommets – ou les nœuds – du graphe, et les flèches les arcs – ou les relations – du graphe ; si, en outre, le nombre d'arcs qui va d'un sommet  $x_i$  à un sommet  $x_j$  ne peut jamais excéder un entier  $p$ , on parlera de  $p$ -graphe [9]. Ce format de représentation apportera des fonctions de traitement mathématique intéressantes dans le cadre de notre problématique : l'arc  $u = (x,y)$  entre une extrémité initiale  $x$  et une extrémité terminale  $y$  ; la boucle  $(x,x)$ , qui est une forme particulière d'arc ; l'hypergraphe, qui est un graphe dans lequel les arêtes sont de cardinalité quelconque (et non plus nécessairement 2 comme dans les graphes) et qui permet donc d'établir une relation entre  $n$  nœuds ; l'ensemble des successeurs d'un nœud  $x$  du graphe  $G$  :  $\Gamma_G^+(x)$  ; l'ensemble des prédécesseurs d'un nœud  $x$  du graphe  $G$  :  $\Gamma_G^-(x)$  ; l'ensemble des nœuds voisins d'un nœud  $x$  :  $\Gamma_G^+(x) \cup \Gamma_G^-(x)$ .

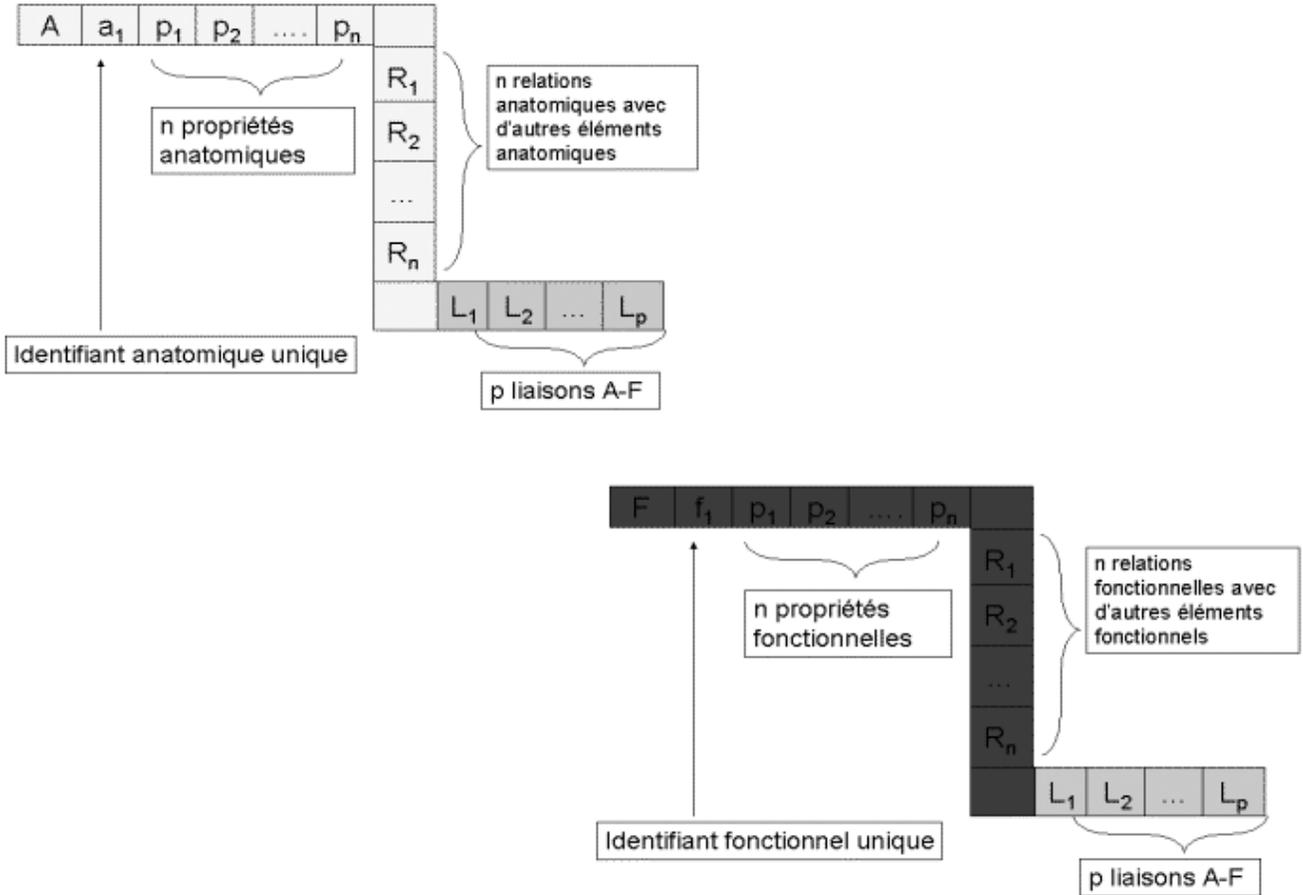


Fig. 5. Structure des composants de base du modèle : élément anatomique (A) ; élément fonctionnel (F).

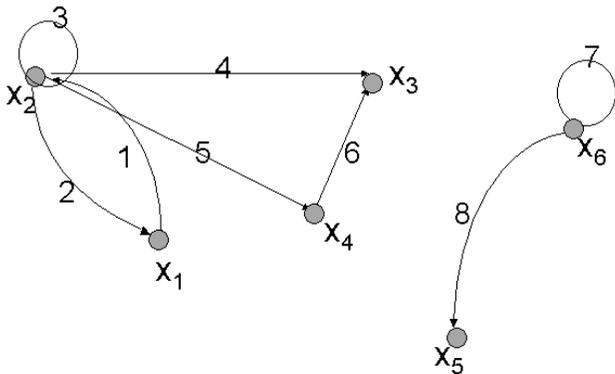


Fig. 6. Un 1-graphe d'ordre 6. Traitement mathématique du réseau anatomique et du réseau fonctionnel.

#### 4.1.3.1. Le réseau anatomique

La représentation propositionnelle du réseau anatomique nécessite la définition de : l'ensemble A, qui contiendra tout élément de type anatomique : {a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>,...} ; l'ensemble RA, qui contiendra tous les types de relations que peuvent entretenir entre eux les éléments anatomiques : {RA1, RA2, RA3...}. Les relations anatomiques sont essentiellement descriptives et corres-

pondent à un regroupement de sous-ensembles d'éléments selon les principaux types d'organisation du système nerveux central : corticale, histologique, chimique, connectique, selon les connaissances de la neuroanatomie. Les grandes catégories de relations sont (1) les relations corticales :  $R_{Cx}(x,y) = \{x \in A, y \in A / \text{les structures cérébrales } x \text{ et } y \text{ sont voisines sur le cortex cérébral et possèdent une frontière commune sous la forme d'un sillon}\}$  ;  $R_{Topo}(x,y) = \{x \in A, y \in A / \text{les structures cérébrales } x \text{ et } y \text{ délimitent un gyrus}\}$  ; (2) les relations de type connectique :  $R_{Fb}(x,y) = \{x \in A, y \in A / \text{les structures cérébrales } x \text{ et } y \text{ sont reliées par la projection d'un faisceau de fibres blanches}\}$  ; (3) les relations chimiques :  $R_{Ch}(x,y) = \{x \in A, y \in A / \text{les structures cérébrales } x \text{ et } y \text{ participent au même circuit chimique}\}$  ; (4) les relations histologiques :  $R_{BA}(x,y) = \{x \in A, y \in A / \text{la structure cérébrale } x \text{ correspond à l'aire de Brodmann } y \text{ (Bay) selon la répartition cytoarchitectonique de Brodmann}\}$  ; (5) les relations de type inclusive (est un) :  $R_{isa}(x,y) = \{x \in A, y \in A / \text{l'élément anatomique } x \text{ est un élément spécifique d'un élément anatomique } y \text{ plus général}\}$ , exemple :  $R_{isa}$  (gyrus frontal supérieur, gyrus frontal) ; (6) les

relations de type partitif (est une partie de) :  $R_{\text{part}}(x,y) = \{x \in A, y \in A/\text{l'entité cérébrale } x \text{ est une partie de la structure cérébrale } y, \text{ qui est une structure cérébrale composite ou une métastructure}\}$ .

#### 4.1.3.2. Le réseau fonctionnel

La représentation propositionnelle du réseau fonctionnel nécessite la définition de l'ensemble F, qui contiendra tout élément de type fonctionnel :  $\{f_1, f_2, f_3, \dots\}$  et de l'ensemble RF, qui contiendra tous les types de relations que peuvent entretenir entre eux les éléments fonctionnels :  $\{RF1, RF2, RF3, \dots\}$ . Dans la vision actuelle du fonctionnement cérébral, dite « connectiviste », on tente d'associer à chaque fonction cérébrale une activité globale d'un réseau de modules localisés. La représentation d'un modèle fonctionnel consiste à définir un certain nombre de processus élémentaires, chacun étant responsable d'une partie du processus fonctionnel global, puis de connecter ces modules entre eux par des relations fonctionnelles. Les relations fonctionnelles sont (1) le regroupement des éléments fonctionnels par grand secteur cognitif ou domaine comportemental :  $R_{\text{Cg}}(x,y) = \{x \in F, y \in F/\text{les fonctions } x \text{ et } y \text{ appartiennent au même secteur cognitif } SC_i\}$  ; par exemple, l'expression (versant expressif) et la compréhension (versant réceptif) pour le langage ; (2) le regroupement par l'entrée des tests neuropsychologiques ou des échelles comportementales :  $R_{\text{test}}(x,y) = \{x \in F, y \in F/\text{les fonctions } x \text{ et } y \text{ sont sollicitées lors de la passation d'une même épreuve neuropsychologique et participent à la performance obtenue au test neuropsychologique } T_i\}$  ; par exemple, l'accès au lexique et l'identification visuelle lors de la passation du test de dénomination DO80 ; (3) le regroupement des éléments fonctionnels selon les modèles cognitifs qui organisent en système complexe intégré des processus plus élémentaires :  $R_{\text{int}}(x,y) = \{x \in F, y \in F/\text{selon un modèle cognitif } MC_i, \text{ on considère que } x \text{ est un processus élémentaire d'un processus } y \text{ plus intégré et plus complexe}\}$  ; par exemple, la boucle phonologique ou le calepin visuo-spatial sont en relation avec la mémoire de travail selon le modèle de Baddeley.

#### 4.1.4. Définition et traitement propositionnel du réseau anatomo-fonctionnel

Le traitement propositionnel doit spécifier les relations inter-réseau et exprimer la structure d'un élément de synthèse anatomo-fonctionnelle selon la formule :  $A + F \rightarrow A - F$ , ainsi que les types de règles ayant permis la synthèse.

##### 4.1.4.1. Les règles anatomo-fonctionnelles

Selon Hécaen, la neuropsychologie n'opère pas directement sur les rapports du cerveau et du comportement,

« ce bilan critique revient à déterminer jusqu'à quel degré de cohérence et de garanties précises il est possible d'imaginer un modèle de ces liens entre cerveau et comportement chez l'homme, qui à la fois utilise le plus d'informations et requiert le moins d'hypothèses » [1]. Il précise que les méthodes de la psychologie expérimentale « conduisent à rechercher des corrélations positives et négatives en formulant le principe de la double dissociation : la lésion  $x$  garde un intérêt si elle produit le syndrome  $a$ , et non le syndrome  $b$ , et quand la lésion  $y$  détermine le syndrome  $b$ , et non le syndrome  $a$  » [1]. La connaissance de l'architecture fonctionnelle du cerveau passe par deux approches complémentaires : approche fonctionnelle chez le sujet sain et approche anatomo-clinique chez le patient atteint de lésion focale et limitée du cerveau. Les règles anatomo-fonctionnelles seront obtenues par (1) les paradigmes de lésion, (2) les paradigmes d'imagerie fonctionnelle. Les règles peuvent être classées en : (i) *expression positive* – lorsque le composant anatomique A est atteint, alors la fonction F est toujours atteinte ; lorsque le sujet réalise une fonction F, alors le composant anatomique A est toujours sollicité (activé) – et (ii) *expression négative* – lorsque le composant anatomique A est préservé, alors la fonction F est toujours respectée (lors de l'accomplissement de la fonction F le composant anatomique A n'est jamais activé). Nous introduisons également des *règles de pondération*, qui permettront de définir le poids de l'entité anatomique A dans l'expression de la fonction F.

##### 4.1.4.2. Définition de la structure d'un élément de synthèse

L'établissement d'une liaison de type anatomo-fonctionnelle entre un élément anatomique (A) et un élément fonctionnel (F) permet de créer un élément de synthèse anatomo-fonctionnelle (A – F). La liaison s'établit à partir des règles anatomo-fonctionnelles ( $A + F \rightarrow A - F$ ). La Fig. 7 représente la production d'un élément de synthèse (A – F). Chaque élément anatomique A et chaque élément fonctionnel F peuvent posséder plusieurs liaisons de type anatomo-fonctionnelles. Si on considère que l'élément anatomique  $a_1$  est intégré dans un réseau anatomique grâce à ses relations anatomiques  $R_1, R_2, \dots, R_m$  et que l'élément fonctionnel  $f_1$  est intégré dans un réseau fonctionnel grâce à ses relations fonctionnelles  $R_1, R_2, \dots, R_m$ , alors l'établissement de la liaison anatomo-fonctionnelle (A – F) introduit un point de jonction entre ces deux réseaux, constituant de fait un réseau anatomo-fonctionnel.

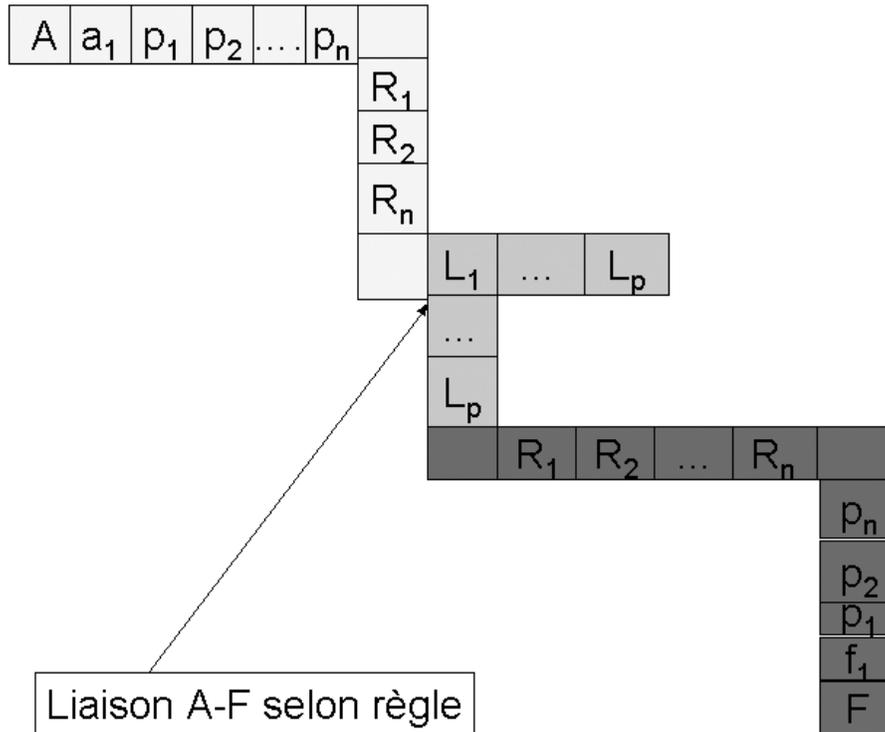


Fig. 7. Production d'un élément de synthèse par une liaison anatomo-fonctionnelle, établie à partir d'une règle :  $A + F \rightarrow A - F$ .

#### 4.1.4.3. Définition de l'architecture du réseau anatomo-fonctionnel

Il s'agit de décrire la structure d'un point de jonction entre un élément du réseau anatomique et du réseau fonctionnel. La théorie des réseaux informatiques apporte les concepts nécessaires. Afin que deux systèmes informatiques puissent s'échanger des données – c'est-à-dire communiquer –, il leur faut régler un grand nombre de problèmes de natures extrêmement différentes. Les solutions sont possibles lorsque les deux machines communicantes structurent leur information de façon identique. Le modèle OSI (*Open Systems Interconnection*) est un modèle théorique élaboré par l'ISO (*International Standardization Organisation*) dans lequel les relations entre un réseau et les services à assurer sont représentés par une hiérarchie de couches et de protocoles normalisés. « Chaque couche, ayant en charge la résolution de problèmes qui lui sont propres, rend alors service à la couche supérieure et s'appuie sur les services rendus par la couche inférieure » [10]. Ce modèle a largement fait ses preuves dans l'ensemble des implantations réseaux qui s'y réfèrent.

En retenant ce principe, nous proposons une première architecture de réseau anatomo-fonctionnel simple, constituée de deux couches : une première couche « anatomie » et une deuxième couche « fonction ». Nous empruntons aussi au modèle OSI les notions de *service* et de *protocole*. Chaque couche utilise les

services de la couche inférieure par le biais d'une interface normalisée. Les services sont accessibles par des points d'accès aux services : SAP (Service Access Point) – chaque SAP est identifié. Les entités de la même couche sur différentes machines sont appelées entités paires. Pour communiquer entre elles, les entités paires ont besoin de définir des conventions de dialogue normalisées : le protocole. Dans la représentation propositionnelle du modèle anatomo-fonctionnel, la mise en œuvre d'un SAP sera définie et fondée par une règle anatomo-fonctionnelle.

## 4.2. Application de la méthode de traitement propositionnelle aux données d'un dossier CAC pour un patient

### 4.2.1. Traitement des données anatomiques d'un patient

« La lésion implique principalement le lobule pariétal inférieur gauche (le gyrus supramarginal, BA 40, et la partie antérieure du gyrus angulaire, BA 39). Elle englobe le sillon intrapariétal. Il existe une extension de la lésion vers la première circonvolution temporale avec une atteinte de l'aire de Wernicke (BA 22) » (Fig. 2). La transcription de cette description anatomique en une forme propositionnelle suppose la définition de l'ensemble des éléments anatomiques impliqués dans la lésion, en précisant de façon extrinsèque leurs propriétés et leurs relations : [A][LbPi][D][lobule parié-

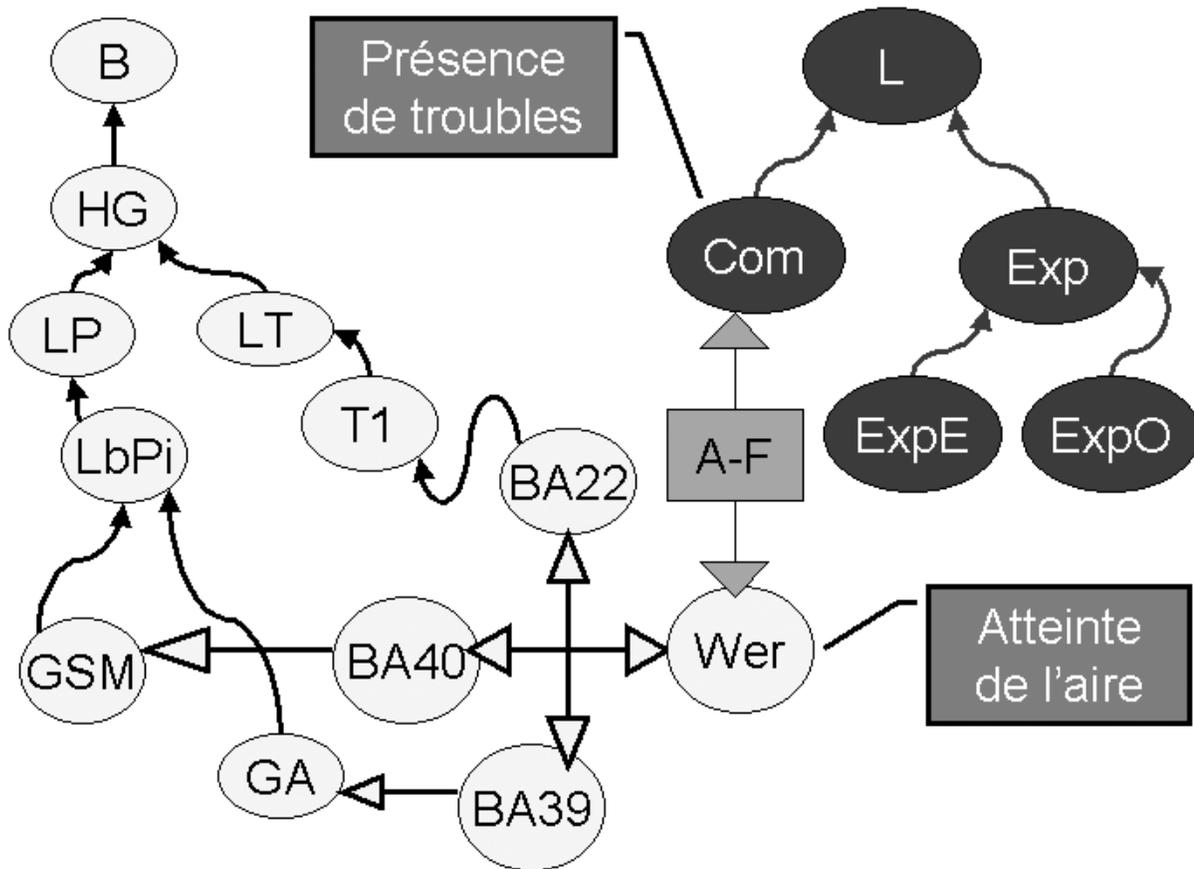


Fig. 8. Traitement des données anatomiques et des données fonctionnelles d'un patient. Constitution du référentiel anatomo-fonctionnel.

tal inférieur]; [A][GSM][D][gyrus supramarginal]; [A][BA40][D][aire de Brodmann 40]; [A][GA][D][gyrus angulaire]; [A][BA39][D][aire de Brodmann 39]; [A][SiP][D][sillon intrapariétal]; [A][T1][D][1<sup>re</sup> circonvolution temporale]; [A][We][D][aire de Wernicke]. La topographie corticale peut être définie de manière hiérarchique : le cerveau est composé de deux hémisphères ; un hémisphère est divisé en lobes principalement délimité par les plus grands sillons : lobe frontal, lobe pariétal, lobe occipital et lobe temporal. Les lobes sont subdivisés par les sillons en circonvolutions (gyrus). Afin de compléter la représentation, on définira les éléments les plus généraux de cette hiérarchie et on introduira des relations de type partitive : [A][B][D][Brain]; [A][Hg][D][Hémisphère gauche]; [A][LP][D][lobe pariétal]; [A][LT][D][lobe temporal];  $R_{part}(HG, B)$ ;  $R_{part}(LP, HG)$ ;  $R_{part}(LT, HG)$ ;  $R_{part}(LbPi, LP)$ ;  $R_{part}(GSM, LbPi)$ ;  $R_{part}(GA, LbPi)$ ;  $R_{part}(T1, LT)$ . Les relations de type histologique permettent d'établir les correspondances en terme d'aires de Brodmann. « L'aire de Wernicke est constituée du tiers postérieur de BA 22 et des parties immédiatement adjacentes du cortex de BA 39-40 » [11] :  $R_{BA}(Wer,$

tiers postérieur(BA22), partie adjacente (BA39), partie adjacente (BA40));  $R_{BA}(GSM, BA40)$ ;  $R_{BA}(GA, BA39)$  (Fig. 8).

#### 4.2.2. Traitement des données fonctionnelles d'un patient

« Le patient présente une aphasie de conduction sur les arguments suivants : (1) des transformations phonémiques ; (2) un manque du mot ; (3) un trouble majeur de la répétition ; (4) une fluence conservée avec un discours peu informatif ; (5) un trouble du maintien en mémoire à court-terme du matériel verbal. Il existe aussi des troubles dépassant le cadre syndromique de l'aphasie de conduction en la présence de troubles de la compréhension et d'une agraphie sévère » (Fig. 2). Cette description des déficits concerne essentiellement le langage. Afin de traduire cette description en une forme propositionnelle, on utilisera un premier réseau fonctionnel constitué sur la base du rapprochement des tests neuropsychologiques avec les divers aspects d'une fonction cognitive (§ 3.1). Cela suppose de définir les éléments fonctionnels nécessaires et d'introduire une relation de type groupe : [F][L][D][langage]; [F][Com]

[D][compréhension, versant réceptif] ; [F][Exp][D][expression, versant expressif] ; [F][ExpO][D][expression modalité orale, aspect praxique] ; [F][ExpE][D][expression modalité écrite, aspect graphique] ;  $R_{C_g}(\{Com, Exp\}, L)$  ;  $R_{C_g}(\{ExpO, ExpE\}, Exp)$  (Fig. 8).

#### 4.2.3. Synthèse anatomo-fonctionnelle des données anatomiques et fonctionnelles

La synthèse des données nécessite que les données anatomiques et les données fonctionnelles soient positionnées sur un référentiel anatomo-fonctionnel, lui-même basé sur les connaissances anatomo-fonctionnelles. Le référentiel anatomo-fonctionnel est obtenu par le rapprochement du réseau anatomique, du réseau fonctionnel et de leurs jonctions réalisées par l'apport de règles de liaison anatomo-fonctionnelle. Cela nécessite de traduire dans une forme propositionnelle, les connaissances à introduire dans le système : « *Damage to Wernicke's area causes severe comprehension as well as naming deficits* » [11] ; il est nécessaire de disposer d'une catégorie de classe de liaison, d'expression positive, de type « *causes severe deficits* », à partir de laquelle nous instancierons un objet « règle de liaison » du même type, avec les références à la littérature :  $L_{CSD}(Wer, Com, [Mesulam, 1998])$ . L'établissement de ce point de jonction permet le rapprochement d'un élément du tableau anatomique du patient (atteinte de l'aire de Wernicke) avec un élément du tableau fonctionnel du patient (présence de troubles de la compréhension) (Fig. 8).

## 4. Discussion

Les résultats obtenus montrent la faisabilité d'une modélisation des connaissances et des données anatomo-

fonctionnelles sur le cerveau et la faisabilité du passage d'un mode de représentation analogique des connaissances et des données à un format de représentation propositionnel. La validation du modèle et du format de représentation passe par l'implantation informatique de la banque de données et les résultats qu'elle produira. Le résultat le plus attendu de cet outil d'intelligence artificielle est la capacité d'élaborer de nouvelles règles anatomo-fonctionnelles. Les premières règles anatomo-fonctionnelles seront éditées par les experts. Si, à partir des règles connues et au fur et à mesure de l'apport de nouvelles données et connaissances apportées au système, ce dernier produit des « lois anatomo-fonctionnelles » stables, intégrant la variabilité interindividuelle et vérifiables sur l'ensemble des données de la base, alors le système sera opérationnel. La production des données d'entrée du système (définition des composants anatomiques ; définition des composants fonctionnels ; description des relations anatomiques ; description des relations fonctionnelles ; introduction des modèles cognitifs ; édition des règles anatomo-fonctionnelles, accompagnées de leurs références à la littérature) représente un travail important s'il s'applique à l'ensemble des structures et des fonctions du cerveau. Ceci impose de limiter dans un premier temps l'application de ce système à un champ anatomo-fonctionnel précis, par exemple l'organisation anatomo-fonctionnelle du lobe frontal. Le projet est de définir les paradigmes permettant d'étudier les processus élémentaires qui permettent l'élaboration des comportements adaptés et de définir leur organisation anatomo-fonctionnelle au sein du cortex préfrontal. Les effets d'une lésion circonscrite du cerveau pourront être analysés par l'outil.

**Remerciements.** Les auteurs remercient Mmes et MM. Martin Albert, Rogerio Beato, Nina Benoît, Stéphane Bonnevey, Laurent Cohen, Catherine Fayada, Fabien Feschet, Peggy Gatignol, Valérie Hahn-Barma, Sylvette Jonas, Michèle Montreuil, Lisa Ouss, Bénédicte Passaquet, Bernard Pillon, Laurent Renie, Andrea Slachevsky, Danielle Sosson et Emmanuelle Volle pour leur aide précieuse au fonctionnement du Centre d'anatomie cognitive. Ce travail a bénéficié d'une subvention du ministère français de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, dans le cadre de l'action concertée incitative « Télémedecine et technologies pour la santé » et d'un soutien des laboratoires Eisai.

## Références

- [1] H. Hécaen, G. Lanteri-Laura, Les fonctions du cerveau, Masson, Paris, 1983.
- [2] Institute of Medicine, Mapping the Brain and its Functions: Integrating Enabling Technologies into Neuroscience Research, National Academy Press, 1991.
- [3] S.E. Palmer, Fundamental aspects of cognitive representation, in: E. Rosch, B.B. Lloyd (Eds.), Cognition and Categorization, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1978, pp. 259–303.
- [4] J. Lautrey, Esquisse d'un modèle pluraliste du développement cognitif, in: M. Reuchlin, J. Lautrey, C. Marendaz, T. Ohlmann (Eds.), Cognition : l'individuel et l'universel, PUF, Paris, 1990, pp. 185–216.

- [5] C. Fayada, J.-L. Truelle, Les troubles du comportement des traumatisés crâniens graves, La lettre du neurologue (à paraître).
- [6] D.M. Bowden, R.F. Martin, NeuroNames Brain Hierarchy, NeuroImage 2 (1995) 63–83.
- [7] K. Brodmann, Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde, Barth, Leipzig, 1909.
- [8] J. Talairach, G. Szikla, P. Tournoux, A. Prosalentis, M. Bornas-Ferrier, Atlas d'anatomie stéréotaxique du télencéphale, Masson, Paris, 1967.
- [9] C. Berge, Graphes et hypergraphes, Monographies universitaires de mathématiques, Dunod, Paris, 1970.
- [10] A. Tanenbaum, Réseaux : architectures, protocoles, applications, InterÉditions, Paris, 1990.
- [11] M.M. Mesulam, From sensation to cognition, Brain 121 (1998) 1013–1052.