

Interprétation collaborative de séries temporelles

Thomas GUYET^{*}, Catherine GARBAY[†], Michel DOJAT[□]

RÉSUMÉ. Lorsque les données sont complexes et volumineuses, un système informatisé peut aider les experts dans leur tâche d'interprétation. Deux questions se posent alors, comment caractériser la tâche d'interprétation pour laquelle il faut suppléer l'expert et quel est le meilleur moyen de lui apporter une aide effective. Dans ce travail, nous définissons l'interprétation collaborative comme un processus d'élicitation du sens des données, selon les axes morphologique, paradigmatique et syntagmatique, par deux collaborateurs, homme et machine, qui communiquent au moyen d'annotations partagées. Le système CATS est présenté comme une opérationnalisation d'un tel processus pour l'interprétation de séries temporelles (signaux physiologiques).

Mots clés : Collaboration homme-machine, opérationnalisation, enaction, annotation, signaux physiologiques

ABSTRACT. When data are complex and abundant, a computerized system can support expert data interpretation process. Two questions then arise: how to characterize the interpretation task to which a computerized support is required and what is the best way to provide an effective support. In this work, we define the interpretation as a collaborative process of extracting meaning from data, according to three axes: morphological, syntagmatic and paradigmatic, performed by two collaborators, human and machine, who interact through shared annotations. The CATS system is presented as an operationalization of such a process for the interpretation of time series (physiological signals).

Key words: Man-machine collaboration, operationalization, enaction, annotation, physiological signals

^{*}AGROCAMPUS OUEST/Laboratoire d'Informatique
65 rue de St Briec, CS 84215, 35042 Rennes Cedex
Thomas.Guyet@agrocampus-ouest.fr
[†] CNRS/Laboratoire d'Informatique de Grenoble
Catherine.Garbay@imag.fr
[□] INSERM/Grenoble Institut des Neurosciences
Michel.Dojat@ujf-grenoble.fr

I INTRODUCTION

Dans un contexte de surveillance de patients en unité de soins intensifs, l'objectif de l'interprétation de signaux physiologiques (séries temporelles) est de construire des modèles qui caractérisent le comportement d'un patient. Ces modèles pourront ensuite être utilisés pour diagnostiquer l'état courant ou prédire l'évolution du patient pour le cas échéant adapter en temps réel la thérapie (Mersmann & Dojat, 2004). Bien que ces données physiologiques soient structurellement simples, elles posent de réels problèmes d'interprétation aux cliniciens du fait notamment d'artéfacts dans les données et de paramètres contextuels variés. Ceci rend difficile l'extraction des informations pertinentes et donc la formalisation de modèles.

L'intelligence artificielle a donné naissance à de nombreux systèmes informatiques d'« interprétation »¹ d'images, de signaux, de textes, etc. Initialement, l'objectif de ces travaux étaient de rendre un système autonome quant à sa capacité d'« interprétation ». Ils sont aujourd'hui plutôt positionnés dans une perspective d'aide à l'interprétation.

Nous proposons de nous appuyer sur un système d'aide à l'interprétation de séries temporelles pour faciliter l'émergence de modèles en interaction avec le clinicien. L'idée est alors de tirer profit de la complémentarité des compétences de la machine et de l'utilisateur :

- travail en extension pour la machine (capacité d'exploration de données volumineuses) ;
- travail en intension pour l'utilisateur (capacité de conceptualisation et de généralisation).

Récemment, nous avons bâti le système CATS (Guyet, Dojat & Garbay, 2007) pour l'aide à l'interprétation de séries temporelles issues du monitoring de patients ventilés artificiellement en soins intensifs. Là où les approches classiques basées sur l'utilisation de connaissances *a priori* des cliniciens montraient leurs limites, le système CATS explore une solution opposée, *i.e.* l'intro-

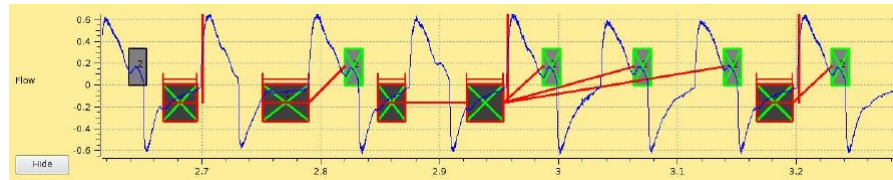


Figure 1 : Interface de CATS montrant l'« interprétation » d'une série temporelle. Les segments sont représentés par des barres horizontales dont les limites gauches et droites indiquent les limites temporelles. Les événements sont représentés par des boîtes dont le niveau de gris définit le type de motif. Les liens entre événements d'un même scénario sont matérialisés par des lignes rouges.

¹ L'utilisation de guillemets sur le terme interprétation rapporte à une opérationnalisation de l'interprétation (associée à une réalisation technique).

duction d'un minimum de connaissance *a priori*, afin que le système construise sa propre « interprétation » des séries temporelles. Nous postulons que la conservation de l'autonomie de chaque collaborateur préserve les différences de point de vue, et permet l'enrichissement mutuel.

Dans ce papier nous rapportons, d'une part, comment l'« interprétation » de séries temporelles a été opérationnalisée et, d'autre part, comment le couple système-utilisateur co-construit des modèles explicatifs des données à partir d'annotations partagées.

II ÉLÉMENTS D'INTERPRÉTATION D'ENREGISTREMENTS PHYSIOLOGIQUES

Le système CATS utilise en parallèle :

- les *données*,
- des *modèles* qui sont la formalisation de connaissances du système à propos des données,
- des *annotations* qui sont des signes correspondants à une proposition d'interprétation communiquée au collaborateur,
- des *abstractions* des données qui constituent, dans leur ensemble, l'« interprétation » des séries temporelles.

Dans ce système, il existe trois niveaux d'abstraction des données (résumés dans la Table 1 et illustrés par la Figure 1) : morphologique, paradigmatique et syntagmatique (Petitot, 1985).

	Annotation	Modèle d'une annotation	Abstraction d'une série temporelle
Morphologique	Segment		Série de segments
Paradigmatique	Évènement	Motif	Série d'évènements
Syntagmatique	Scénario	Graphe de motifs	

Table 1 : Éléments d'« interprétation » d'une série temporelle

Au niveau morphologique, les données sont annotées par des *segments*. Chaque segment délimite une partie contiguë d'une série temporelle par sa date de début et sa durée. Il a deux représentations :

- sa représentation dans les données : un ensemble de valeurs datées, contiguës dans le temps, dont le nombre peut varier.
- sa représentation par le système CATS : un vecteur dont chaque composante correspond à une caractéristique morpho-mathématique du segment (*e.g.* valeur moyenne, tendance, existence de singularité).

L'intérêt de la seconde représentation est de faciliter la comparaison entre segments de durées différentes. Un segment est une forme saillante. L'abstraction d'une série temporelle permet de construire une *série de segments*.

Au niveau paradigmatique, un *évènement* est une annotation qui associe une partie contiguë d'une série temporelle (un segment) à un *motif*. Sur un signal physiologique, un évènement s'inscrit sur une courte durée, *e.g.* le débranchement d'un capteur ou une extrasystole détectée dans un électrocardiogramme. Un motif est le modèle d'un ensemble de segments similaires. Nous le représentons sous la forme d'un segment prototypique (vecteur homogène à un vecteur représentant un segment), et un vecteur de poids qui indique la significativité de chaque composante pour l'évènement. Le système dénomme chaque motif par un nom symbolique. L'évènement porte alors le nom du motif auquel il est associé. L'abstraction d'une série temporelle permet de construire une *série d'évènements*.

Au niveau syntagmatique, un *scénario* est une annotation qui associe un ensemble d'évènements à un *graphe de motifs*. Par exemple, la chute brutale d'un paramètre physiologique (*e.g.* SpO2) s'interprète différemment si elle s'accompagne ou non de l'évolution d'autres paramètres. Un graphe de motifs est représenté comme un ensemble de motifs liés par des contraintes temporelles entre motifs. Le système associe également un nom symbolique (dit syntagmatico-paradigmatique) à chaque graphe de motifs. Un graphe de motifs qui est *reconnu* permet au système d'annoter un scénario. Un scénario est représenté par un ensemble d'évènements et le nom symbolique du graphe de motifs auquel il fait référence.

III CONSTRUCTION D'UNE INTERPRÉTATION

III.1 Parcours interprétatif

Depuis Schleiermacher (Schleiermacher, 1977), l'interprétation n'est plus simplement vue comme une construction unidirectionnelle et linéaire de sens depuis l'objet, mais comme un processus complexe, individuel, mettant en concurrence ou en collaboration plusieurs *points de vue* entrelacés : plusieurs sources ou modalités de perception, plusieurs saillances, plusieurs granularités d'abstraction. La construction du sens se fait au cours d'un *parcours interprétatif* et vise à réduire l'espace liminal séparant le sujet – l'utilisateur ou le système – et l'objet – les séries temporelles. La réduction de l'espace liminal passe par l'établissement de ponts entre l'objet et le sens construit par le sujet, ce qui pose deux types de problèmes (*cf.* Figure 2) (Garbay, 2009) :

- le saut sémantique, par lequel le sujet se construit une interprétation de l'objet consistante à un niveau plus global (G1) depuis ses perceptions locales et inconsistantes (L1).
- le saut praxéologique, par lequel le sujet passe à un point de vue local (L2) depuis une intention globale (G2) formulée comme le résultat de la compréhension de l'objet (G1).

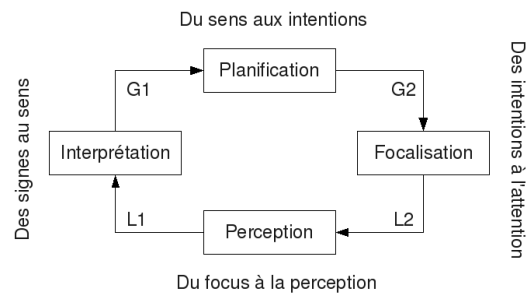


Figure 2 : Entrelacement des problèmes de sauts sémantique et praxéologique (Garbay, 2009)

Le sujet s'enrichit de ses parcours interprétatifs non seulement en modifiant ses concepts mais également en élargissant ses capacités de perception (par l'identification de nouvelles saillances) et de focalisation (par l'apprentissage de schèmes sensori-moteurs).

III.2 Opérationnalisation d'un parcours interprétatif

Le système CATS limite l'utilisation de connaissances *a priori* sur les résultats attendus : les motifs et les graphes de motifs ne sont pas donnés au système mais sont découverts par celui-ci. Pour faire cela, le système possède deux types d'algorithmes : les *algorithmes d'annotation* qui construisent des annotations des données à partir des modèles, et les *algorithmes de construction*, par apprentissage non-supervisé, de modèles (motifs et graphes de motifs) à partir des séries temporelles et des annotations. Pour chacune de ces deux tâches, des algorithmes spécifiques à chaque niveau ont été mis en place. La Figure 1 représente ces algorithmes inscrits dans le schéma général d'abstraction des séries temporelles.

Nous décrivons succinctement les algorithmes qui sont représentés par les flèches dans la Figure 3 :

- 1) la segmentation est obtenue par un algorithme de reconnaissance de forme dans les séries temporelles. Les formes qui sont recherchées sont celles qui caractérisent les motifs connus par le système.
- 2) les motifs sont construits à l'aide d'un algorithme incrémental de catégorisation (*clustering*). Les segments (en représentation vectorielle) sont regroupés dans un nombre *non-prédéfini* de classes. Chaque classe de segments identifie un motif. De plus, l'algorithme extrait les caractéristiques du motif par une méthode de sélection des caractéristiques.
- 3) la symbolisation classe chaque segment dans l'une des classes de segments (*i.e.* un motif). En dessous d'un certain seuil, le segment n'est associé à aucun motif.

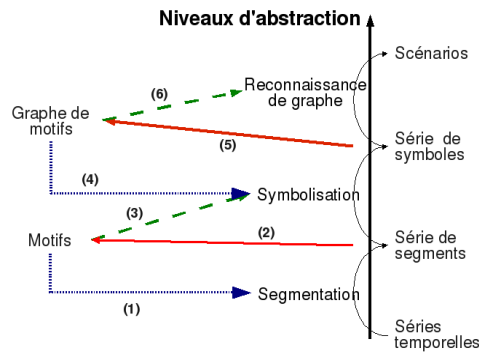


Figure 3 : Algorithmes de construction de modèles en traits pleins : (2) construction des motifs, (5) construction des graphes de motifs. Algorithmes d'annotations en traits pointillés fins et larges : (1) segmentation, (3) annotation par des événements, (4) modification de l'annotation des événements, (6) annotation par des scénarios.

- 4) À partir des scénarios déjà découverts, le système complète les séries de symboles de sorte à mieux correspondre au graphe de motifs (recherche de consistance).
- 5) Un algorithme d'apprentissage de motifs fréquents extrait les graphes de motifs avec les contraintes temporelles.
- 6) La reconnaissance de graphes de motifs est obtenue par effet de bord de l'algorithme précédent.

L'« interprétation » des séries temporelles par le système CATS, en tant que processus, est l'exécution en parallèle² et répétée des algorithmes de construction de modèles et d'annotations. Le système CATS a été conçu comme un système multi-agents qui comporte six types d'agents. Chaque type correspond à l'implémentation d'un algorithme. Dynamiquement, des agents sont créés et supprimés.

Du fait des cycles de dépendance entre éléments d'une « interprétation » (cf. Figure 3), les résultats obtenus par un algorithme, à un instant donné, peuvent être remis en cause si ses données d'entrée ont été modifiées. Il est alors nécessaire de répéter l'exécution de l'algorithme jusqu'à la convergence, *i.e.* lorsque les modèles et les annotations forment un ensemble consistant.

III.3 Collaboration par le couplage au travers d'un environnement

L'individualité des interprétations et la disparité des caractéristiques (de perception et de raisonnement) posent aux collaborateurs le problème de l'échange de leurs interprétations. Sur le plan sémantique, le sens construit par le système (ou par l'utilisateur) est difficilement accessible à son alter-ego, et

² La parallélisation est simulée : l'ordre dans lequel sont exécutés les agents est partiellement aléatoire mais un agent exécute d'un trait l'intégralité de son algorithme.

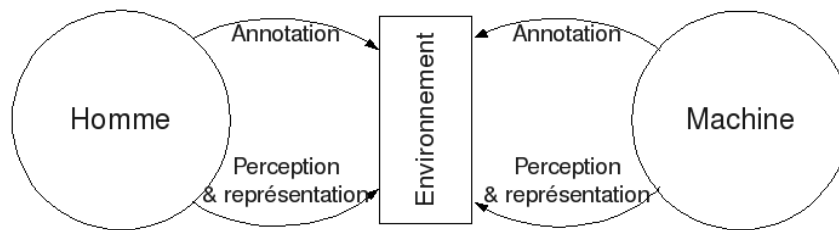


Figure 4 : Couplage Homme-Machine par l'environnement

sur le plan praxéologique, ce sont les intentions qui sont difficilement partageables.

Nous proposons une approche collaborative de l'interprétation inspirée de l'enaction (Varela, Thompson & Rosch, 1993). Dans cette approche, illustrée par la Figure 4, l'utilisateur et la machine sont couplés au travers d'un environnement commun dans lequel se situe l'objet interprété.

Dans cet environnement, chaque collaborateur peut objectiver son interprétation courante sous la forme d'annotations. Une annotation est une marque ancrée dans l'environnement à laquelle un observateur peut associer un contenu sémantique. Pour qu'elle puisse servir de support à la communication, la marque doit être une forme saillante pour les deux collaborateurs, tandis que le contenu sémantique est reconstruit individuellement par chacun d'eux.

Dans le couplage Homme/Machine, l'interaction par des annotations :

- 1) tend à ce que chacun d'eux puisse construire sa propre « interprétation » des données ;
- 2) permet l'échange indirect des interprétations.

Les annotations, locales et spécifiques à chaque point de vue sur les données, agissent comme des perturbations de l'« interprétation ». Elles peuvent provoquer des modifications de l'interprétation jusqu'à obtenir une consistance entre les deux collaborateurs. Cette consistance n'est pas directe puisqu'elle passe par l'interprétation que se fera chacun de l'environnement commun. Le couplage doit conduire à la consistance entre : 1) le système et l'objet, 2) l'utilisateur et l'objet, et enfin 3) le système et l'utilisateur. De plus, chaque collaborateur, lorsqu'il réalise son interprétation, doit rechercher la consistance entre ses représentations et l'environnement (objets plus annotations).

III.4 Dimension collaborative de CATS

Dans le système, l'interprétation collaborative est médiée par des annotations (Guyet, 2007) : l'utilisateur a accès visuellement aux annotations du système et peut transmettre des informations au système via des annotations. Deux formes d'annotation sont possibles :

- l'ajout de segments ou d'évènements,
- la modification des segments ou des évènements.

Une fois que les annotations ont été ancrées dans l'espace commun qu'est l'interface graphique, elles sont utilisées par CATS comme des éléments d'« interprétation » que le système aurait lui-même créés. La modification d'un segment se traduit par la suppression du segment et l'ajout d'un nouveau avec les nouvelles limites temporelles. Lors de la suppression, un segment est également supprimé de la classe obtenu lors de la catégorisation des segments. L'ajout d'un évènement implique, d'une part, l'ajout d'un segment correspondant à l'annotation et, d'autre part, l'ajout du segment dans la classe correspondante au motif de l'évènement. Ainsi, l'ajout d'un évènement peut directement provoquer la modification de la classification.

La Figure 1 illustre l'interface au travers de laquelle l'utilisateur du système CATS visualise et modifie l'« interprétation » en cours sous la forme d'annotations partagées d'une série temporelle.

IV POSITIONNEMENT PAR RAPPORT À L'EXISTANT

Les points importants de notre approche sont résumés en les comparant avec d'autres systèmes d'aide à l'interprétation :

- les éléments de l'« interprétation » se situent sur trois dimensions : morphologique, paradigmatique et syntagmatique. C'est le caractère de notre système le moins spécifique. En « interprétation » d'images, des méthodes permettant de mettre en relation des formes élémentaires connues ont été rapidement utilisées pour abstraire des formes plus complexes (*e.g.* systèmes d'interprétation d'images MESSIE (Sandakly & Giraudon, 1995)).
- les formes de base d'une « interprétation » ne sont pas prédéfinies, mais sont construites de manière non-supervisée. Le système de Heutte (Heutte, Nosary & Paquet, 2004) est un système de reconnaissance de textes manuscrits qui permet une révision des croyances sur la structure des lettres.
- notre approche n'est pas purement bottom-up, puisque les trois dimensions sont en relation réciproque : morphologique/paradigmatique, paradigmatique/syntagmatique (il y a des rétroactions), et les trois dimensions sont traitées en parallèle. Ce principe a été étudié en premier lieu au travers des black board tel BB1 (Hayes-Roth, 1985).
- le processus est dirigé par la recherche d'une consistance de l'ensemble des annotations et des modèles. Le processus s'arrête lorsque tous les éléments sont stabilisés. À notre connaissance, peu de système explicite la recherche d'une consistance comme heuristique de construction d'une « interprétation », il nous semble néanmoins que la plupart l'utilise implicitement. En revanche, certains systèmes cherchent à s'affranchir de la contrainte forte de la consistance soit pour prendre en compte des connaissances floues ou imprécises soit pour gérer explicitement des informations contradictoires.
- l'« interprétation » peut être perturbée au travers d'annotations d'un utilisateur extérieur, elle n'est pas supervisée par l'utilisateur, et moins *a priori* est introduit dans les modèles (le mécanisme de segmentation qui sert de base à l'« interprétation » évolue et est adapté par le système lui-même). À

notre connaissance, aucun système n'a utilisé des marques symboliques comme médium d'une communication entre un système et un utilisateur en vue de conserver leur indépendance. Ce mode de communication peut être rapproché du mode de communication des têtes parlantes de Steels (Steels, 2003), qui échangent des mots, à propos de formes choisies sur un tableau blanc partagé, en vue de construire un langage commun.

V ÉVALUATION & RÉSULTATS

Nous avons évalué (Guyet, Dojat & Garbay, 2007) la capacité du système CATS à construire une « interprétation » de séries temporelles de manière autonome et d'autre part l'apport de la collaboration au moyen d'annotations avec des utilisateurs (2 cliniciens et 5 physiologistes). L'utilisation des séries simulées permet de mesurer la *performance* du système par la distance entre l'annotation réalisée avec l'annotation attendue.

Les résultats montrent que CATS construit de manière autonome une « interprétation » des séries temporelles (modèles et annotations). Bien que la convergence vers une consistance globale ne soit pas obtenue, le système améliore ses annotations au cours du temps, affinant ainsi son « interprétation » des données.

Pour évaluer la collaboration, le système est simulé selon une méthode de Magicien d'Oz. On dispose ainsi de la réactivité nécessaire que l'implémentation actuelle du système n'atteint pas. L'opérateur du Magicien d'Oz fait volontairement des erreurs semblables à celles du système. Pendant l'interprétation, les actions de l'utilisateur sont tracées : nombre de clics sur les types et les annotations. La collaboration réduit de 32% ($\pm 27\%$) le nombre nécessaire d'actions pour réaliser une annotation par rapport à ce qui serait nécessaire sans aide automatique. En cela, on peut dire que le système aide un utilisateur à *annoter* les séries temporelles. Il faut noter que les suppressions d'annotation font partie des actions. Le fait d'avoir à supprimer certaines « erreurs » de CATS n'augmente donc pas le nombre global d'actions à mener par l'utilisateur.

En revanche, pour aider à interpréter, la principale difficulté rencontrée par les utilisateurs est liée à la faiblesse sémantique des annotations. Une annotation n'est actuellement qu'une marque symbolique et, en particulier, elle ne permet pas d'informer sur l'intention de son auteur ou le contexte de sa création. De ce fait, l'utilisateur comprend difficilement les actions du système et la recherche d'intention du système devient une surcharge de travail.

VI DISCUSSION & CONCLUSION

La concrétisation de l'approche collaborative nécessite de pouvoir proposer un système qui ait suffisamment d'autonomie d'« interprétation ». C'est la condition *sine qua none* pour que puisse émerger du couplage plus que ce que chaque collaborateur peut faire. La communication médiée des annotations, telle que proposée dans CATS, est une solution pour allier l'échange d'information et autonomie d'interprétation.

Néanmoins, trois points, qui sont à l'œuvre dans un processus d'interprétation, nous semblent devoir être améliorés pour CATS :

- la quantité des saillances,
- la multitude d'entrelacements des processus,
- l'intentionnalité.

Le champ des saillances de la machine est très faible par rapport à un utilisateur, d'autre part, la capacité de focalisation sur des saillances est souvent l'apanage du concepteur du système d'« interprétation » mais n'est pas acquise par le système. Concevoir un système capable d'« interprétation » impose de lui donner d'une part une grande diversité de perception et de lui déléguer la sélection des saillances les plus pertinentes. Au travers de la méthode de classification et de catégorisation du système CATS, le système est capable de sélectionner les caractéristiques saillantes des formes en repérant les caractéristiques parmi un grand nombre. Cela rend le système capable d'affiner ses perceptions aux données, mais le champ d'adaptation reste encore peu étendu.

Nous avons mis en évidence dans la Section III.1 que l'interprétation était l'entrelacement de processus travaillant sur différents points de vue. Le système CATS montre la possibilité de mettre en œuvre en parallèle plusieurs processus entrelacés en travaillant sur trois niveaux d'abstraction morphologique, paradigmatique et syntagmatique. La récursivité entre syntagmes et concepts reste à explorer et permettrait de prendre en compte la granularité temporelle des données.

Une interprétation est toujours réalisée pour quelque chose, et le système repose sur la recherche d'une consistance comme finalité. D'une part, il peut être souhaitable de n'avoir qu'une consistance partielle. D'autre part, un problème se pose quand la finalité n'est pas partagée par les deux collaborateurs. CATS ne peut ni modifier ses intentions ni les faire partager à l'utilisateur. Il est alors parfois difficile à l'utilisateur de comprendre le comportement du système (et d'accepter ses annotations) si il ne peut y associer une intention. Le problème du saut praxéologique reste donc à traiter dans le cadre du système CATS.

En conclusion, l'opérationnalisation de l'interprétation collaborative a permis de proposer un système original d'aide à l'interprétation de signaux physiologiques. Bien que des améliorations du système CATS soient nécessaires (intentionnalité du système et un élargissement des capacités « perceptives »), cette réalisation met en évidence la faisabilité d'une approche collaborative médiée par des annotations.

VII REFERENCES

- C. Garbay (2009). Computer vision: a plea for a constructivist view. In *Proceedings of the 12th Artificial Intelligence In Medicine* (pp. 6–15).

- T. Guyet (2007). Annotation: A support for co-interpretation. In *Fourth International Conference on Enactive Interfaces* (pp. 113–116).
- T. Guyet, M. Dojat & C. Garbay (2007). Knowledge construction from time series data using a collaborative exploration approach. *Journal of Biomedical Informatics*, 40, 672–687.
- B. Hayes-Roth (1985). A blackboard architecture for control. *Artificial Intelligence*, 26(3), 251–321.
- L. Heutte, A. Nosary & T. Paquet (2004). A multiple agent architecture for handwritten text recognition. *Pattern Recognition*, 37(4), 665–674.
- S. Mersmann & M. Dojat (2004) SmartCare - Automated clinical guidelines in critical care. In *16th European Conference on Artificial Intelligence* (pp. 745–749).
- J. Petitot-Cocorda (1985). *Morphogénèse du sens*, PUF.
- F. Sandakly & G. Giraudon (1994). Scene Analysis System. In *Proceedings of the International Conference of Image Processing* (pp. 806–810).
- F. Schleiermacher (1997). *Hermeneutics: The handwritten Manuscripts*. Misooula: Scholars.
- L. Steels (2003) Evolving grounded communication for robots. *Trends in Cognitive Science*, 7(7), 308–312.
- F. Varela, E. Thompson & E. Rosch (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit*. Seuil.