



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Projet cortex

Intelligence neuromimétique

Lorraine

THÈME 3A

*R*apport
d'Activité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
2. Présentation et objectifs généraux	1
3. Fondements scientifiques	3
3.1. Le connexionnisme	3
3.2. L'intégration neurosymbolique	3
3.3. La modélisation biologique	3
3.3.1. Modèles neuromimétiques élémentaires	4
3.3.2. Modèles neuromimétiques comportementaux	4
4. Domaines d'application	4
4.1. Panorama	4
4.2. Représentation de l'information	5
4.3. Tâches cognitives	5
4.4. Architectures dédiées	5
5. Logiciels	6
5.1. Bibliothèque neuronale	6
5.2. Interface avec le robot Koala	6
5.3. Plates-formes de développement	6
5.4. MicroNOMAD	7
6. Résultats nouveaux	7
6.1. Modèles neuromimétiques comportementaux	7
6.2. Modèles neuromimétiques élémentaires	8
6.3. Intégration neurosymbolique	9
6.4. Implantations matérielles	10
8. Actions régionales, nationales et internationales	11
8.1. Actions régionales	11
8.1.1. Collaboration avec l'INIST	11
8.1.2. Action Téléopération et Assistants Intelligents du CPER	12
8.1.3. Action Calcul, Réseaux, Graphisme à haute performance (CRG) du CPER	12
8.1.4. Réseau Grand-Est des Sciences de la Cognition	12
8.2. Actions nationales	12
8.2.1. Exploitation de systèmes d'information géographique	12
8.2.2. Action de Recherche Coopérative NOSE	13
8.2.3. Programme Interdisciplinaire Cognition et Traitement de l'Information du CNRS - Projet Aversion olfactive	13
8.2.4. Programme Interdisciplinaire Cognition et Traitement de l'Information du CNRS - Projet Nez électronique	14
8.2.5. Projet Robéa du CNRS - Apprentissage de transformations visiomotrices	14
8.2.6. Projet de l'Action Concertée Incitative Cognitive - Cognition spatiale	14
8.2.7. Projet de l'Action Concertée Incitative Cognitive - Action : Affordances et conception d'interface humain-machine : une approche esthétique de l'interaction	14
8.2.8. Action spécifique du CNRS : Suppléance perceptive et interface	14
8.2.9. Convention avec le Musée de La Villette	15
8.3. Actions européennes	15
8.3.1. Projet IST MirrorBot	15
8.3.2. Réseau d'excellence NEUROCOLT II	15
8.3.3. Contrôle de machines industrielles	15
8.3.4. Projet IST EICSTES	16

8.3.5. Projet IST Scholnet	16
8.4. Actions internationales	16
8.4.1. Projet STIC avec la Tunisie	16
8.4.2. Action conjointe INRIA-NSC Taiwan	17
9. Diffusion des résultats	17
9.1. Animation de la Communauté scientifique	17
9.2. Enseignement	17
10. Bibliographie	17

1. Composition de l'équipe

CORTEX est un projet du LORIA (UMR 7503) commun au CNRS, à l'INRIA, à l'Université Henri POINCARÉ Nancy 1, à l'Université Nancy 2 et à l'Institut National Polytechnique de Lorraine.

Responsable scientifique

Frédéric Alexandre [Directeur de Recherche INRIA]

Assistante de projet

Martine Kuhlmann [CNRS, à temps partiel dans l'équipe]

Personnel INRIA

Nicolas Rougier [Chargé de Recherche (à partir du 1/10/02)]

Personnel CNRS

Dominique Martinez [Chargé de Recherche]

Personnel Université

Yann Boniface [Maître de Conférences, U. Nancy 2]

Laurent Bougrain [Maître de Conférences, UHP]

Bernard Girau [Maître de Conférences, U. Nancy 2]

Jean-Charles Lamirel [Maître de Conférences, U. Strasbourg (en délégation à l'INRIA)]

Chercheurs doctorants

Shadi Al Shehabi [Syrie (à partir du 1/12/02)]

Mohammed Attik [INRIA (à partir du 1/12/02)]

Claudio Castellanos Sanchez [CONACYT-SFERE]

Didier Fass [Doctorant en Biologie]

Olivier Ménard [Supélec (à partir du 1/10/02)]

Olivier Rochel [UHP]

Bruno Scherrer [INRIA]

Georges Schutz [Luxembourg]

Julien Vitay [INRIA (à partir du 1/10/02)]

Chercheur post-doctorant

Etienne Hugues [ARC NOSE]

Spécialiste

Alistair Bray [Spécialiste INRIA (jusqu'au 30/08/02)]

Ingénieurs

Philippe Beylik [Ingénieur associé INRIA]

François Parmentier [Ingénieur expert INRIA (à partir du 1/12/02)]

Collaborateur extérieur

Hervé Frezza-Buet [Enseignant-Chercheur à Supélec]

2. Présentation et objectifs généraux

Le but de nos recherches est d'étudier les propriétés et les capacités d'un traitement automatique de l'information réalisé sur des bases distribuées, numériques et adaptatives. Plus précisément, nous cherchons à montrer qu'un tel type de traitement peut permettre la réalisation de systèmes « intelligents », c'est-à-dire capables d'extraire de la connaissance à partir de données et de manipuler cette connaissance pour résoudre des problèmes. L'ensemble de ces capacités est obtenu par la mise au point de modèles connexionnistes neuromimétiques (*cf.* § 3.1) développés selon deux sources d'inspiration, les neurosciences (*computational neurosciences*) et l'apprentissage automatique (*machine learning*).

Nous privilégions la voie neuromimétique pour plusieurs raisons. Elle possède intrinsèquement de fortes capacités adaptatives ainsi que des caractéristiques numériques et distribuées ; elle facilite le traitement des

données perceptives ; elle peut facilement être rattachée à des données et des modèles dans les domaines des statistiques et des neurosciences qui étudient le traitement automatique de l'information selon cette même voie neuromimétique.

Ces deux domaines d'inspiration sont étudiés de front car ils posent les mêmes questions relatives aux capacités de représentation interne et de manipulation de la connaissance de ces modèles distribués et ils proposent des solutions complémentaires pouvant s'enrichir mutuellement.

Le domaine d'inspiration statistique nous fournit des modèles numériques de traitement de l'information permettant d'extraire des connaissances à partir de données. Ces modèles peuvent également être combinés avec d'autres techniques classiques de traitement automatique de l'information (cf. § 3.2).

Le domaine d'inspiration neurobiologique propose des modèles théoriques et des mécanismes élémentaires pour certaines fonctions de représentation et de traitement de l'information animales ou humaines facilitant son exploitation ultérieure pour des tâches sensorimotrices (cf. § 3.3). Il indique de plus que l'une des caractéristiques essentielles de l'intelligence est de permettre au sujet de donner des réponses satisfaisantes alors qu'il est confronté à des situations complexes, peu structurées et incluant de nombreux paramètres. Cette propriété, très recherchée dans le domaine du traitement automatique de l'information, oriente les applications de nos recherches.

En effet, de manière complémentaire à nos domaines d'inspirations pluridisciplinaires, nous finalisons nos recherches dans un but essentiellement technologique vers des domaines tels que l'interprétation de données et de signaux, les capteurs intelligents, la robotique, la conduite de processus industriels et l'aide à la décision. Plus généralement, c'est le pilotage de systèmes complexes, multimodaux, agissant sur leur environnement qui est visé à travers ces applications (cf. § 4.1).

Ces travaux informatiques sont implantés en premier lieu sur des ordinateurs classiques, mais nous explorons également d'autres voies que sont les architectures parallèles, les robots autonomes et plus généralement les circuits spécialisés pour systèmes embarqués, tous ces supports étant naturellement suggérés par les applications visées (cf. § 4.4).

Le défi majeur posé par nos recherches est celui de la maîtrise du phénomène d'émergence inhérent à cette approche ascendante et distribuée. En effet, nous élaborons des systèmes de grande taille par la programmation locale d'unités simples de traitement numérique munies de coefficients adaptatifs alors que la fonction attendue est obtenue par émergence, comme résultat de l'interaction de l'ensemble de ces unités distribuées.

Ce phénomène est observé dans les trois actions de recherche que nous menons actuellement. Premièrement, à un niveau global, nous développons des modèles neuromimétiques comportementaux (cf. § 6.1), pour permettre la navigation autonome d'un robot. Pour cela, nous implantons et interfaçons des modèles de cortex associatif (coordination sensorimotrice), cortex frontal (organisation temporelle du comportement) et hippocampe (localisation). Deuxièmement, à un niveau plus fin, nous étudions des modèles neuromimétiques élémentaires (cf. § 6.2), nous permettant de revenir au fonctionnement binaire du neurone (émission de potentiels d'action). Ce travail se ramène à l'étude de phénomènes temporels au sein d'assemblées de tels neurones. Troisièmement, à un niveau intermédiaire, nous travaillons sur des modèles neuronaux continus classiques et étudions leur adaptation à des problèmes d'exploration de bases de données, dans la perspective d'une intégration neurosymbolique (cf. § 6.3).

Soulignons enfin trois thèmes importants au centre de nos recherches.

(i) L'autonomie : nos systèmes doivent apprendre à réaliser leur tâche sans connaissance explicite *a priori* et sans aide extérieure. On conçoit l'intérêt de cette propriété pour, par exemple, faire face à des situations imprévues dans le cas de la navigation d'un robot ou encore pour compenser les dérives ou les changements de caractéristiques dans le cas d'un capteur intelligent.

(ii) L'apprentissage : l'exigence d'autonomie nous conduit à doter nos systèmes de capacités d'apprentissage très fortes en abordant les notions de mémoire à court et à long terme, d'apprentissage continu et incrémental, d'apprentissage procédural et déclaratif et de révision des connaissances.

(iii) Les tâches cognitives : les réseaux de neurones artificiels ont été longuement étudiés sous l'angle de leurs rapports avec les statistiques et le traitement de données. L'originalité de notre approche est de montrer d'une part que l'on peut étendre leurs domaines d'utilisation à des tâches plus cognitives, comme le raisonnement

ou la planification, et d'autre part que l'on peut extraire ou incorporer des connaissances dans ces modèles numériques et distribués.

3. Fondements scientifiques

3.1. Le connexionnisme

Mots clés : *connexionnisme, réseau neuromimétique, réseau de neurones artificiels, perceptron, perceptron multi-couches, carte auto-organisatrice, classification, statistique.*

Le connexionnisme peut être défini comme l'étude de graphes d'unités simples interconnectées, effectuant des calculs numériques élémentaires à partir de leurs entrées et de paramètres internes. On connaît plus particulièrement le connexionnisme neuromimétique qui étudie les réseaux de neurones artificiels comme les modèles de perceptron ou les cartes auto-organisatrices. Ces modèles ont été largement étudiés sous l'angle de leurs capacités d'apprentissage et de leurs similitudes avec des classificateurs statistiques (c'est ainsi que l'on peut qualifier le perceptron multicouches « d'approximateur universel »). Par ailleurs, d'autres modèles tentent de revenir vers les fondements du connexionnisme et sont développés en s'inspirant de la biologie (cf. § 3.3), afin d'obtenir des modèles de neurones plus réalistes ou de viser des tâches relatives à la modélisation du comportement.

Une autre caractéristique remarquable des réseaux de neurones artificiels est qu'ils ont été appliqués avec succès à un grand nombre de tâches (mise en correspondance, prédiction, contrôle) dans des domaines très différents (traitement de signal et de données, procédés industriels, finance, médecine). Le point commun de ces problèmes est de pouvoir être posés de manière à utiliser les capacités associatives des réseaux de neurones artificiels, vus comme des classificateurs. En revanche, les modèles connexionnistes sont plus difficiles à mettre en œuvre pour des tâches de plus haut niveau cognitif, comme le raisonnement. L'intégration neurosymbolique (cf. § 3.2) propose des réponses à ces limitations.

3.2. L'intégration neurosymbolique

Mots clés : *intégration neurosymbolique, modèle hybride, combinaison de classificateurs, extraction de connaissances.*

L'intégration neurosymbolique consiste à élaborer des modèles de traitement de l'information alliant les avantages des approches neuronales (apprentissage, généralisation, résistance au bruit, traitement perceptif efficace) et symboliques (explication, structuration des connaissances, manipulation symbolique efficace). Cette intégration peut se réaliser selon deux voies.

L'hybridation neurosymbolique propose des méthodologies de couplage entre modèles classiques des deux approches et se pose donc des problèmes de combinaison et de coordination de modèles de nature différente, ainsi que de stratégies de sélection du meilleur modèle. Une telle démarche a fait ses preuves dans des problèmes complexes du monde réel où l'on dispose à la fois de données numériques et de connaissances symboliques dont l'exploitation commune se révèle plus fructueuse que le choix d'une seule source d'information.

L'unification neurosymbolique pour sa part postule que le formalisme connexionniste seul peut être un support pour le rapprochement des deux approches symboliques et neuronales. Il peut s'agir d'implanter des algorithmes classiques de l'intelligence artificielle sous un formalisme neuronal ou encore de montrer comment de la connaissance peut être extraite ou introduite dans un réseau de neurones artificiels classique (cf. § 6.3).

3.3. La modélisation biologique

Mots clés : *neurosciences computationnelles, modèle cortical, assemblée neuronale, colonne corticale, neurones impulsionnels.*

La modélisation biologique consiste pour nous à utiliser des données des neurosciences pour proposer de nouveaux modèles neuronaux pour le traitement automatique de l'information. Ces données peuvent concerner le fonctionnement élémentaire du neurone, aussi bien que l'identification des flux d'information engagés dans des tâches cognitives.

3.3.1. Modèles neuromimétiques élémentaires

L'inspiration des neurosciences propose une alternative intéressante au codage en champ continu : le codage temporel par impulsion. En effet, les neurones ont une activité à temps continu mais en tout ou rien (envoi de *spikes* pouvant intervenir à n'importe quel instant) qui est généralement modélisée en continu par une mesure de leur fréquence. Conserver ce codage temporel par impulsion peut apporter une représentation plus riche de l'information (par exemple en exploitant les retards de décharge entre neurones) et plus robuste (plus grande résistance au bruit). De plus, ce fonctionnement se prête bien aux implantations matérielles que nous visons (*cf.* § 4.4).

3.3.2. Modèles neuromimétiques comportementaux

Notre modèle cortical, dont les principes sont développés depuis plus de dix ans en collaboration avec d'autres chercheurs des neurosciences cognitives, est fondé sur la notion d'assemblées neuronales, les colonnes corticales, assurant des opérations élémentaires d'un niveau plus fonctionnel et plus intégré que le simple neurone formel. Dans nos modèles, ces assemblées, vues comme unités de traitement, sont groupées au sein d'aires, typées par la nature des informations traitées.

Cet axe de recherche consiste à définir la logique de fonctionnement et d'apprentissage des unités et à en étudier les conséquences sur les capacités d'apprentissage et de représentation de l'information, dans des réseaux de telles unités.

Nous abordons tout d'abord le problème sous l'angle de l'apprentissage afin que notre unité neuronale complexe détecte des événements sensorimoteurs au sein d'aires corticales et que cette information puisse être représentée topologiquement, comme des batteries de filtres. Le second point concerne la logique d'activation des unités, chacune représentant un événement du monde extérieur ou un état interne du système en particulier. Les états d'activation des unités doivent pouvoir représenter des concepts aussi différents que la présence de l'événement, son inhibition, le souhait qu'il se produise ou la recherche des conséquences de son activation éventuelle. De plus, des transitions entre états d'activation doivent être permises par apprentissage, de manière à construire un graphe causal, typé par la sémantique des aires, représentant les inter-relations entre ces unités. Ces inter-relations sont en fait une représentation interne des invariants du monde extérieur ou des conséquences de l'action du système sur ce monde.

Réaliser une tâche (de perception, d'analyse de scène, de décision, de navigation) avec ce formalisme consiste à créer le réseau d'unités qui en sera le support. Tout d'abord, nous définissons, du point de vue des neurosciences, les principaux flux d'information impliqués dans cette tâche, en termes de capteurs, d'effecteurs, d'aires corticales et éventuellement de zones extracorticales. Ensuite, nous implantons des modèles de ces différentes structures neuronales et de leurs interconnexions en étudiant plus particulièrement les aspects de synchronisation des flux d'information et d'émergence dans de tels réseaux distribués.

Nous avons ainsi exploré divers domaines perceptifs concernant en particulier des tâches de traitement visuel et auditif. Nous avons également étudié des tâches d'intégration multimodale comme la reconnaissance invariante par combinaison de fonctions de localisation et de reconnaissance, ainsi que la coordination sensorimotrice. Nous avons enfin abordé le problème de l'organisation temporelle du comportement incluant des notions de mémoire de travail et de planification.

4. Domaines d'application

4.1. Panorama

Mots clés : *interprétation de signaux, robotique, interaction perception/action.*

D'une manière générale, notre approche consiste à promouvoir une technique de traitement automatique de l'information fondée sur des caractéristiques à la fois numériques, adaptatives et distribuées. Ceci nous permet d'opérer le transfert de nos résultats à deux niveaux en proposant, d'une part, de nouvelles techniques de codage et de représentation de l'information et, d'autre part, des applications intégrées exploitant ces caractéristiques pour la résolution de tâches typiquement humaines. Enfin, de manière transversale, nous étudions également l'implantation de ces algorithmes sur des architectures dédiées.

4.2. Représentation de l'information

La problématique de l'intégration neurosymbolique nous fait envisager des relations entre les aspects numériques et symboliques et l'information. Ceci nous amène donc à étudier les capacités de représentation et de codage des réseaux de neurones artificiels, afin de faciliter un couplage ultérieur avec des approches symboliques ou une extraction de connaissances à partir d'un traitement neuronal. C'est ainsi que nous nous intéressons actuellement à des tâches d'interprétation et d'analyse de données (*cf.* § 8.3, § 8.2 et § 8.1) qui, à partir de bases de données de grande taille (géographiques, industrielles ou bibliographiques), proposent une structuration et une exploitation raisonnée des connaissances implicitement disponibles.

Par ailleurs, l'inspiration des neurosciences nous permet de développer de front et de comparer deux formalismes de calcul neuronal, le calcul classique en champ continu et le codage temporel par impulsion. En particulier, nous nous attachons à comparer, selon les applications visées, les coûts et les performances respectifs de ces deux approches.

4.3. Tâches cognitives

Dans notre perspective cognitive des modèles neuromimétiques, nous étudions la modélisation de comportements cognitifs typiquement humains. C'est ainsi que nous avons étudié dans le passé des tâches de perception, d'intégration multimodale ou de planification. Nous nous intéressons actuellement, dans un cadre biologique, à différentes stratégies de codage de l'information visuelle à des fins de représentation ou de localisation d'indices pour un robot autonome (*cf.* § 8.2) et dans un cadre statistique, à l'extraction de connaissances à partir de données (*cf.* § 6.3).

4.4. Architectures dédiées

Si notre approche propose de nouveaux modes de traitement de l'information, elle suggère également de nouvelles architectures de calcul pour les implanter. Trois supports sont étudiés. D'une part, d'un point de vue global, l'étude de comportements autonomes nous fait explorer la voie robotique, comme validation naturelle de tels comportements. L'architecture computationnelle est donc classique. Seule importe là la notion d'autonomie et d'embarquement des programmes. D'autre part, nous tentons d'exploiter le parallélisme intrinsèque du calcul neuronal par deux études de parallélisation sur des supports à grain fin et à grain grossier.

En ce qui concerne les méthodes de parallélisation à grain fin, le support privilégié est le matériel programmable (FPGA), permettant de bénéficier simultanément de la simplicité d'une approche de type logiciel, et d'un grain de parallélisme bien adapté à la simplicité des calculs neuronaux élémentaires. De plus, le choix d'un tel support est intéressant pour une part importante des utilisations pratiques des réseaux de neurones, puisqu'il permet d'obtenir des implantations à la fois rapides, embarquables, flexibles et peu coûteuses (*cf.* § 8.2). Ces caractéristiques représentent un avantage évident pour l'utilisation de méthodes neuronales au sein de systèmes autonomes (robotique, microsystemes, etc.).

Pour la parallélisation à gros grain, nous nous intéressons, dans le cadre de l'action CRG du CPER, à l'implantation de nos modèles sur des machines parallèles classiques de type MIMD (*cf.* § 8.1). Nous travaillons ici sur l'hypothèse vraisemblable que ces machines parallèles d'architecture généraliste vont se démocratiser et qu'il est donc pertinent de pouvoir faciliter l'implantation de modèles neuronaux sur ces machines. Cette implantation n'est pas immédiate car les types de parallélisme des réseaux de neurones (grain fin, communication par messages) et de ces machines (processeurs puissants plutôt orientés vers la communication par mémoire partagée) sont très différents. Le but de notre travail est donc de proposer

une interface entre ces deux grains de parallélisme, permettant d'accélérer les exécutions des algorithmes neuronaux tout en diminuant les temps d'implantation.

5. Logiciels

5.1. Bibliothèque neuronale

Participants : Yann Boniface [correspondant], Laurent Bougrain, Olivier Rochel.

Mots clés : *parallélisme, MIMD.*

Cette bibliothèque de fonctions sur le langage 'C' est un outil permettant d'implanter des algorithmes neuronaux et de les exécuter sur machines parallèles comme séquentielles. C'est donc une interface entre le parallélisme des réseaux de neurones (grain fin) et celui des machines parallèles MIMD à mémoire partagée (gros grain). Le but de cet outil est double. Du point de vue du développement il permet d'implanter les réseaux connexionnistes au niveau du neurone et d'utiliser ses propriétés parallèles. Il facilite la programmation et la lisibilité du code résultant. Du point de vue de l'exécution, il permet d'exécuter les modèles coûteux en temps de calcul sur machines parallèles, donc d'accélérer les exécutions et de rendre plus utilisables les réseaux et de développer des réseaux de plus grande taille. Nous offrons ainsi aux connexionnistes un outil d'aide au développement de réseaux de neurones utilisant les propriétés parallèles des modèles connexionnistes pour permettre leur exécution sur machines parallèles sans modification des algorithmes dans ce sens. Cette bibliothèque a déjà été diffusée à nos collaborateurs (à Metz, Lyon, Strasbourg et Amsterdam).

5.2. Interface avec le robot Koala

Participants : Alistair Bray, Hervé Frezza-Buet, Nicolas Rougier [correspondant].

Mots clés : *comportement autonome.*

Nous étendons notre modèle de système visuel développé pour un robot de Koala, basé sur des principes biologiques et neuromimétiques. Le système est hiérarchique, multi-couches et adaptatif. Il vise à modéliser une rétine et des régions corticales (jusqu'à l'aire IT de cortex visuel) pour le traitement visuel. Le système est efficace, il fournit une présentation graphique (GDK/GTK) très simple des différents niveaux modélisés, et peut être utilisé en mode *online* ou *offline*. A un niveau plus haut, il extrait des caractéristiques globales à partir de la couleur et de la forme d'une séquence d'images, selon une fonction des statistiques spatiales et temporelles aux niveaux plus bas. Ces caractéristiques robustes peuvent être exploitées pour la reconnaissance de lieux dans un environnement.

Le travail actuel procède sur des axes théoriques et pratiques. Premièrement, nous avons mis en application un mécanisme de commande à base de gradient visuel qui permet au robot de se diriger en utilisant un gradient visuel entre la vue actuelle et la vue cherchée. Deuxièmement, nous exploitons des moyens très récents pour maximiser la prévisibilité temporelle en utilisant des méthodes statistiques non-linéaires (*cf.* § 6.3) afin de créer une version beaucoup plus modulaire de ce système visuel distribué et hiérarchique. Troisièmement, nous étendons les capacités graphiques de l'interface GDK/GTK pour rendre le système plus accessible et plus simple à utiliser, en particulier pour qu'il n'exige pas un utilisateur expert.

Dans le cadre de l'ARC NOSE (*cf.* § 8.2), nous étendons l'interface avec le robot Koala à la prise en compte de signaux issus d'une matrice de capteurs olfactifs. Dans le cadre du projet européen MirrorBot (*cf.* § 8.3) nous avons acquis un robot autonome PeopleBot plus perfectionné auquel nous essayons de transférer actuellement les fonctions de cette interface.

5.3. Plates-formes de développement

Participants : Yann Boniface, Hervé Frezza-Buet [correspondant].

Mots clés : *plate-forme de développement, modèle neuronal.*

Une grande part des travaux de l'équipe repose sur la programmation d'automates distribués (colonnes corticales, neurones impulsionsnels, etc.). Nous avons donc développé une plate-forme commune de développement (visualisation des variables internes, débogage, exécution contrôlée, etc.) sur la base du langage C++ et des bibliothèques GDK/GTK.

En collaboration avec Supélec, qui a développé une architecture client/serveur permettant le contrôle des effecteurs (roues, caméra orientable) ainsi que la réception d'information en provenance des différents capteurs (capteurs infrarouges/luminosité et image vidéo) du robot Koala, nous débutons actuellement la fusion des trois systèmes logiciels présentés plus haut, ce qui permettrait à l'équipe de travailler sous le même environnement et pourrait être ultérieurement diffusé à l'extérieur.

5.4. MicroNOMAD

Participant : Jean-Charles Lamirel [correspondant].

Mots clés : *extraction de connaissances, bases de données.*

Le logiciel MicroNOMAD est un logiciel dédié principalement à l'extraction et à la structuration de connaissances contenues dans des bases de données. Le principe de base de ce logiciel est de fournir à un utilisateur des cartographies interactives et interconnectées matérialisant différentes synthèses du contenu de la base étudiée. Le modèle sous-jacent au fonctionnement de ce logiciel représente une extension du modèle SOM de Kohonen à un contexte multicarte, ou multi points de vue. Du fait de la souplesse de l'extension proposée, les cartes fournies par le logiciel peuvent à la fois faire office d'outils de navigation élaborée, d'outils de fouille de données, ainsi que d'outils d'aide à la formulation de requêtes sur la base étudiée. Le modèle permet d'exploiter des échanges dynamiques entre des points de vue multiples sur la base concernée afin d'établir des corrélations entre différentes vues sur les mêmes données. Il permet également de travailler avec des représentations incomplètes ou partielles des données et tolère la cohabitation de plusieurs média de représentation pour les mêmes données. Le logiciel MicroNOMAD a été utilisé pour différentes applications opérationnelles de fouille de données (cf. § 8.3 et § 8.4). Les versions 1 et 2 de ce logiciel ont fait l'objet d'un dépôt de brevet de la part de l'INRIA.

Le logiciel MicroNOMAD-MultiSOM a été choisi comme un des deux logiciels de référence pour l'analyse des données du Web dans le cadre du projet européen EICSTES (cf. § 8.3). La version 3 qui propose de nombreuses extensions dédiées à l'analyse des données non structurées ainsi que de nombreuses fonctions d'automatisation de l'analyse est en cours de développement en collaboration avec l'INIST/CNRS dans le cadre de ce projet.

6. Résultats nouveaux

6.1. Modèles neuromimétiques comportementaux

Participants : Frédéric Alexandre, Yann Boniface, Alistair Bray, Claudio Castellanos Sanchez, Hervé Frezza-Buet, Nicolas Rougier, Julien Vitay.

En ce qui concerne les modèles neuromimétiques d'inspiration biologique visant à réaliser des tâches comportementales intégrées, nous avons principalement poursuivi notre travail de modélisation de l'axe visiomoteur, avec pour principales applications à la robotique autonome, la localisation d'objets dans l'espace et la coordination sensorimotrice.

Concernant la coordination sensorimotrice, nous étudions actuellement des mécanismes neuronaux permettant de construire une représentation exploitable de l'environnement, même si le robot bouge ou oriente différemment sa caméra. Ceci est réalisé par l'intégration progressive, à partir de l'information sensorielle visuelle, des données de mouvement de la caméra puis des roues et de l'apprentissage de la conséquence de tels mouvements sur les modifications de la perception [3]. Ceci est principalement étudié dans le cadre du projet européen MirrorBot (cf. § 8.3) et du projet de l'action Robéa du CNRS (cf. § 8.2).

Concernant la localisation d'objets, nous nous sommes intéressés, dans le cadre d'un projet de l'ACI COGNITIVE (*cf.* § 8.2) à la réalisation de différents types de codage de l'information visiospatiale, pouvant correspondre à un codage catégoriel (position relative) ou métrique (position absolue) et dont on pense qu'ils pourraient être respectivement situés dans les hémisphères gauche et droit.

Ces deux domaines de recherche nécessitent l'utilisation de primitives d'extraction d'indices visuels, adaptés à une utilisation ultérieure dans le cadre de fonctions sensorimotrices. Ce fut un des principaux buts du séjour dans notre équipe d'Alistair Bray, recruté comme spécialiste. Nous avons ainsi développé une méthode statistique permettant d'apprendre des filtres visuels non-linéaires en optimisant un critère d'invariance [4][14]. Les filtres ainsi obtenus sont semblables à ceux réalisés par certains neurones du cortex visuel communément appelés « cellules complexes » [10]. Leur utilisation en robotique mobile pour permettre au robot koala de se localiser dans l'environnement est en cours d'évaluation [9]. Ce travail se poursuit dans le but d'améliorer le mécanisme d'apprentissage pour construire une représentation hiérarchique de complexité croissante semblable à celle que l'on trouve dans le cortex visuel.

Nous nous intéressons désormais également à la perception visuelle dynamique, dans la perspective d'applications embarquées (sur la base de calculs locaux massivement parallèles) en robotique autonome. Nous nous inspirons du parcours du flot optique (défini comme un champ de projections de vecteurs de vélocité dans une image, permettant de passer d'une image à l'autre au sein d'une séquence), depuis la rétine vers les aires visuelles et l'aire temporale moyenne et supérieure (MT et MST). Dans ce cadre, Claudio Castellanos-Sanchez étudie les différents traitements spatio-temporels du flot optique pour donner une réponse au mouvement des objets dans une scène. Il modélise ces traitements sous forme de filtres spatio-temporels et d'architectures connexionnistes modélisant les aires temporales (MT et MST), afin d'inférer à partir d'une séquence d'images le champ de mouvement, l'égomotion et la structure de la scène.

Enfin, notre activité dans ce domaine neuromimétique comportemental a consisté à poursuivre l'intégration de ces modèles sur notre plate-forme robotique (*cf.* § 5.2) et le développement de bibliothèques (*cf.* § 5.1) et de logiciels spécialisés (*cf.* § 5.3) visant à mieux manipuler ces modèles complexes, en particulier par l'utilisation de machines parallèles et d'interfaces graphiques.

6.2. Modèles neuromimétiques élémentaires

Participants : Frédéric Alexandre, Yann Boniface, Bernard Girau, Etienne Hugues, Dominique Martinez, Olivier Rochel.

L'étude du codage neuronal nécessite le développement d'une plateforme de simulation informatique intégrant les fonctionnalités élémentaires du modèle de neurone impulsionnel. Les équations différentielles couplées décrivant la dynamique de chaque neurone ne peuvent pas être résolues analytiquement et doivent donc être approximées par des méthodes d'intégration numérique. Les outils de simulation utilisables actuellement sont peu adaptés : ils sont plutôt dédiés à des modélisations biologiques fines, ou à des cas simplifiés pour des applications particulières. De ce fait, un algorithme événementiel efficace a été mis au point dans le cadre de la thèse de Olivier Rochel [17]. Une étude comparative (théorique et en simulation) des performances de cet algorithme par rapport à d'autres méthodes a été engagée, avec comme paramètres certaines caractéristiques des réseaux (taille, topologie, activité ...) ainsi que le besoin en précision (pas de temps ...). Dans ce but, une première version d'une bibliothèque de fonctions utilisant cet algorithme a été réalisée. D'autre part, cet algorithme, de par sa nature événementielle, se prête à des méthodes de parallélisation particulières, dont l'étude et l'emploi constituent l'un des prochains objectifs à atteindre dans le cadre de l'opération CRG (*cf.* § 8.1).

L'implantation parallèle de ce type de réseaux nous permettra d'étudier les mécanismes d'apprentissage pouvant amener des neurones à se synchroniser ou se désynchroniser pour apprendre des patterns temporels. Un tel paradigme de calcul basé sur une synchronisation des décharges neuronales possède une certaine plausibilité biologique. En effet, de nombreuses expériences chez l'animal ont montré que des neurones du cortex visuel dont les champs récepteurs -la partie de l'image à laquelle ils sont sensibles- sont excités par le même objet se synchronisent de manière assez précise, assurant ainsi une mise en commun temporelle du

traitement neuronal concernant le même objet. Cette synchronisation pourrait donc être le mécanisme à la base de l'extraction d'objets. Ces faits nous ont amenés naturellement à étudier, pour l'extraction de contours, le codage neuronal et les conditions d'une synchronisation. Un réseau de neurones impulsionnels sélectifs à l'orientation a été construit [12], associé à un filtrage de l'image adapté à la détection de contours. On montre que la synchronisation des neurones excités par un contour est une propriété naturelle dès que les connexions relient des neurones dont les champs récepteurs sont susceptibles de concerner un même contour. Des résultats analytiques permettent de comprendre le comportement du réseau en fonction des propriétés du contour. Cette étude sur la synchronisation se poursuit à la fois théoriquement mais aussi expérimentalement en s'appuyant sur des applications de robotique autonome, en particulier pour le traitement d'informations visuelles ou olfactives dans le cadre de l'Action de Recherche Coopérative NOSE de l'INRIA (cf. § 8.2).

6.3. Intégration neurosymbolique

Participants : Frédéric Alexandre, Shadi Al Shehabi, Mohammed Attik, Yann Boniface, Laurent Bougrain, Hervé Frezza-Buet, Jean-Charles Lamirel, Bruno Scherrer, Georges Schutz.

Ces travaux correspondent à l'extension de modèles classiques du connexionnisme pour l'extraction de connaissances expertes, mais aussi pour mieux comprendre leur fonctionnement du point de vue de l'apprentissage statistique. D'une part, nous avons entrepris l'extraction de régularités dans des phénomènes temporels. Ainsi, nous nous sommes intéressés au contrôle de machines industrielles (cf. § 8.3) d'une part et à l'étiquetage automatique des états de la vigilance à partir de signaux physiologiques d'autre part (cf. § 8.4). Ce type d'étude nécessite une analyse des données à des échelles de temps différentes afin de comprendre quelles informations permettent d'optimiser une production ou de prévenir un trouble du sommeil.

Par ailleurs, l'intégration de la théorie systémique de la communication dans le fonctionnement propre d'un système de recherche d'information/fouille de données est une contribution originale des travaux de recherche de l'équipe. Elle s'avère notamment particulièrement adaptée au traitement de média complexes, comme les images. Cette approche a impliqué cependant la conception de modèles spécifiques susceptibles de développer des propriétés d'interaction forte avec un utilisateur, ainsi que des propriétés d'adaptation étendues. Un exemple important de tel modèle est le modèle de conjonction de cartes, ou de classification multicritères, que nous avons développé. Ce modèle, qui porte le nom de MicroNOMAD-MultiSOM représente une extension importante du modèle SOM de Kohonen (cf. § 5.4). Les capacités de déduction automatique du modèle représentent notamment un sérieux atout par rapport aux méthodes de classification usuelles utilisées en analyse de données. Ces dernières ne permettent en effet pas d'exploiter dynamiquement plusieurs points de vue, qui peuvent être considérés comme plusieurs dimensions, relatives à la même information.

Nous nous sommes consacrés cette année à mettre en place des critères d'évaluation de la qualité des résultats des classifications numériques qui soient indépendants du type de méthode de classification utilisée, ainsi que de la dimension intrinsèque des données à classifier. Ces propriétés, qui ne sont pas vérifiées par les critères d'évaluation usuels, tels que les critères de variance, s'avèrent cependant indispensables pour évaluer le résultat des classifications se rapportant à des données documentaires. Les données documentaires ont en effet comme caractéristique de faire appel individuellement à des espaces descriptifs de faible taille souvent peu recouvrants, ce qui génère conjointement des espaces descriptifs globaux de forte dimension, mais de faible densité. Les méthodes que nous avons mis en place nous ont permis de mener à bien des comparaisons objectives entre les méthodes de classification usuellement appliquées au domaine documentaire. Ces comparaisons nous ont permis de mettre en évidence la supériorité d'une approche basée sur les points de vue, telle que celle qui est proposée par MicroNOMAD-MultiSOM, relativement à l'approche globale, couramment appliquée. Elles nous ont également permis de montrer la supériorité des méthodes topographiques de type SOM vis à vis des méthodes concurrentes. Enfin, les critères que nous avons définis nous ont permis de mettre en place une méthodologie d'optimisation du nombre de classes d'une classification documentaire. Nous avons notamment expérimenté cette méthodologie pour l'analyse des données en provenance du Web fournies par le projet EICSTES (cf. § 8.3).

Les limitations des méthodes numériques, telles que MicroNOMAD-MultiSOM, sont liées aux erreurs d'interprétation qu'elles peuvent générer si elles sont utilisées sans précaution préalable par des non spécialistes pour des tâches d'analyse fine d'un domaine. De leur côté, les méthodes symboliques qui peuvent être utilisées dans le même but, telles que les treillis de Gallois, présentent l'inconvénient de fournir des résultats souvent inexploitable car trop touffus et/ou trop détaillés. Nous avons montré qu'il était possible de faire collaborer ces deux types de méthodes en définissant des équivalences entre les treillis de Gallois et les cartes topographiques. Ces équivalences permettent de générer des interprétations strictes et hiérarchisées sur les cartes, et permettent également, à l'inverse, de définir des points focaux d'entrée dans les treillis de Gallois. Nous prolongeons nos études sur les correspondances entre les deux types de méthodes afin d'utiliser les treillis de Gallois en tant qu'outils de validation des déductions thématiques produites par l'interaction entre les cartes dans le modèle MicroNOMAD-MultiSOM.

Ces dernières études, ainsi que celles concernant la validation théorique du modèle MicroNOMAD-MultiSOM par l'intermédiaire de sa comparaison avec des modèles formels, tels que les modèles probabilistes, font l'objet d'un travail de thèse qui débute actuellement.

Enfin, nous essayons également d'aborder l'important domaine de l'apprentissage par renforcement dans le cadre d'une collaboration avec le projet MAIA qui se concrétise par le co-encadrement de la thèse de Bruno Scherrer.

Nous avons montré que le calcul d'un plan optimal dans un processus décisionnel de Markov admettait une réponse qui est naturellement connexionniste. Pour ce faire nous avons montré que l'on pouvait voir un processus décisionnel de Markov comme une architecture connexionniste. Les unités de cette architecture sont les états. Les connexions sont le support de codage de la dynamique. La récompense est estimée de manière répartie sur l'ensemble des unités. Enfin la fonction de valeur optimale, qui est la représentation duale du plan, est une activité distribuée dans le réseau et l'algorithme de la littérature Value Iteration est une loi de propagation de cette activité. Une telle vision permet d'envisager de répondre à des problèmes d'apprentissage par renforcement d'une manière massivement parallèle (donc potentiellement rapide) et tolérante aux pannes.

6.4. Implantations matérielles

Participants : Frédéric Alexandre, Philippe Beylik, Yann Boniface, Laurent Bougrain, Claudio Castellanos Sanchez, Bernard Girau, Dominique Martinez, Olivier Rochel.

Dans le domaine de la parallélisation à grain fin, les spécificités des applications neuronales rendent souhaitable l'utilisation de circuits intégrés programmables (FPGA). Nos travaux dans ce domaine explorent plusieurs approches.

Les contraintes de taille et de topologie des supports matériels programmables nous ont d'abord amenés à proposer un paradigme de calcul neuronal qui permette de définir naturellement des architectures de réseaux de neurones faciles à implanter sur circuit numérique programmable, grâce à un protocole de partage des connexions disponibles par un nombre important de connexions virtuelles.

Nous avons ensuite fait une première étude de l'implantation sur FPGA de deux modèles connexionnistes utiles dans nos travaux de recherche en perception visuelle pour la robotique autonome (*cf.* § 6.1) :

- réseaux de convolution : un module d'implantation semi-parallèle de ces réseaux à couches très complexes a été développé,
- réseaux impulsionsnels (spike) : les premiers résultats des travaux d'implantation du modèle LEGION sur FPGA ont été très prometteurs (nos premières simulations laissaient entrevoir la possibilité d'implanter simultanément environ 1000 neurones avec un temps de calcul réduit de plusieurs ordres de grandeur).

Avec l'aide d'un ingénieur associé INRIA (P. Beylik) nous avons donc débuté un ensemble de travaux d'implantation concrète de réseaux de neurones sur FPGA, qui vise à terme la conception d'un outil logiciel d'aide à l'implantation numérique programmable de réseaux de neurones. En effet, si l'utilisation de ces circuits se généralise, l'implantation de modèles connexionnistes y reste difficile pour un non spécialiste. Un outil de synthèse dédié aux réseaux de neurones est donc indispensable pour qu'un plus grand nombre d'utilisateurs bénéficient des apports de ces circuits dans le cadre du calcul connexionniste.

Suite à notre première étude, nous avons donc poursuivi et optimisé l'implantation du modèle LEGION sur une carte FPGA équipée d'un Virtex XCV1000E (équivalent à 1 million de portes logiques). Actuellement, ces travaux sont d'une part appliqués au traitement d'images (interface FPGA/mémoire) et d'autre part réexprimés selon des codes VHDL génériques compatibles avec un outil de synthèse paramétrable.

Pour ce qui concerne la parallélisation à gros grain, nous avons achevé le développement d'une bibliothèque de fonctions pour le langage C, permettant de concilier deux parallélismes distincts : le parallélisme à grain fin des réseaux de neurones et celui à gros grain des machines parallèles MIMD. Pour ce faire notre bibliothèque (cf. § 5.1) propose aux utilisateurs des fonctions leur permettant une utilisation du parallélisme neuronal pour l'implantation de leurs modèles. La bibliothèque utilise ensuite, sans apport supplémentaire de la part du programmeur, les informations apportées par ce parallélisme connexionniste, à grain fin, pour effectuer l'implantation sur machines parallèles MIMD à mémoire partagée, implantation parallèle à gros grain. Par les fonctions proposées, notre simulateur veut être un outil de recherche d'aide au développement de nouveaux algorithmes connexionnistes. Son utilisation du parallélisme neuronal favorise notamment une algorithmique connexionniste distribuée.

En termes de performances, l'implantation de diverses topologies connexionnistes et neuromimétiques nous a permis de constater deux propriétés de notre simulateur. Nous obtenons de bonnes performances sur des modèles répondant au modèle théorique, des modèles contenant un parallélisme intrinsèque, les modèles plutôt neuromimétiques. Les performances parallèles de la bibliothèque augmentent avec la charge de calcul, et donc la taille, du réseau implanté. Cet outil est ainsi plus particulièrement destiné à l'implantation, à l'utilisation et à l'étude des réseaux d'inspiration biologique, important domaine de recherche de notre équipe.

Nous finalisons actuellement le développement d'une interface graphique sur cette bibliothèque, interface principalement dédiée aux modèles neuromimétiques (cf. § 5.3).

Enfin, nous mettons également en œuvre l'implantation de ces mêmes modèles d'inspiration biologique sur la plate-forme robotique Koala. Nous avons en particulier développé les premières étapes du traitement de l'image et de l'asservissement des mouvements du robot (cf. § 5.2).

8. Actions régionales, nationales et internationales

8.1. Actions régionales

8.1.1. Collaboration avec l'INIST

Participants : Jean-Charles Lamirel, François Parmentier.

Il s'agit ici de proposer des solutions neuromimétiques à la création de représentations facilement interprétables, à partir de bases bibliographiques de grande taille. La principale caractéristique de ce problème est que l'espace d'entrée est de grande taille (grand nombre de mots clés), mais relativement peu fourni en exemples. Nous avons donc tout d'abord travaillé à la recherche neuronale des meilleurs sous-espaces de projection et nous avons poursuivi par l'extraction et la représentation de concepts, permettant de mieux interpréter ces bases.

Une autre gamme de solutions neuromimétiques sur laquelle nous travaillons également actuellement est le problème de la détection des documents marginaux ou des tendances marginales dans une base documentaire. Les approches que nous proposons sont basées sur l'expérimentation de différents types de projecteurs neuromimétiques implantant des fonctions de détection de nouveauté.

Le domaine d'application des solutions que nous mettons en place est celui de l'analyse des relations entre les différents laboratoires de recherche du domaine académique. Nos études mettent en parallèle l'analyse automatisée du contenu des pages des sites rattachés aux institutions avec l'analyse des liens présents dans les pages. Les techniques multi-vues que nous utilisons rendent possible la détection des corrélations entre les acteurs et les thématiques de recherche, mais également celle des corrélations inter-acteurs et inter-thématiques.

Un deuxième volet de notre activité concerne le portage au format XML d'une bibliothèque dédiée au traitement de l'information documentaire dont une version prototype avait déjà été préalablement développée à l'INIST, sous le nom de DILIB. Le portage XML de DILIB représente un gage d'interopérabilité entre la bibliothèque et l'ensemble des applications manipulant de l'information semi-structurée. Il permettra également de faciliter le traitement des données Web, dégageant ainsi un plus large champ à nos approches d'analyse de données dans le domaine documentaire.

8.1.2. Action Téléopération et Assistants Intelligents du CPER

Participants : Frédéric Alexandre, Alistair Bray, Hervé Frezza-Buet, Dominique Martinez.

Dans le cadre du Contrat de Plan Etat Région, nous participons au projet Téléopération et Assistants Intelligents dont un des buts est d'étudier, avec des partenaires locaux d'écoles d'ingénieur et de laboratoires d'automatique, des systèmes de surveillance de processus industriels commandés à distance. Plus précisément, notre rôle est de développer un système connexionniste de perception visuelle d'inspiration biologique et de considérer son intégration dans le cadre de la robotique autonome.

8.1.3. Action Calcul, Réseaux, Graphisme à haute performance (CRG) du CPER

Participants : Frédéric Alexandre, Yann Boniface, Dominique Martinez, Olivier Rochel.

Dans le cadre du Contrat de Plan Etat Région, nous participons au projet Calcul, Réseaux, Graphisme à haute performance et, avec le support de ses machines, nous réalisons l'implantation de nos modèles sur des machines parallèles classiques de type MIMD, à l'aide de la bibliothèque que nous développons depuis plusieurs années (cf. § 5.1).

Dans le cadre particulier de la simulation de neurones impulsionsnels, la nature asynchrone des neurones impulsionsnels nous a amenés à privilégier l'approche événementielle (événements discrets à temps continu) notamment pour des questions de précision numérique. Cette approche étant difficilement conciliable avec la bibliothèque actuelle, nous étudions donc une implantation parallèle dédiée à l'algorithme événementiel mis au point dans le cadre de la thèse d'Olivier Rochel. Le logiciel résultant de cette étude devrait permettre à terme la simulation de réseaux de neurones de grande taille pour l'étude du codage impulsionsnel et en particulier la simulation d'un modèle du bulbe olfactif développé dans le cadre de l'Action de Recherche Coopérative NOSE de l'INRIA (cf. § 8.2).

8.1.4. Réseau Grand-Est des Sciences de la Cognition

Participants : Frédéric Alexandre, Laurent Bougrain, Hervé Frezza-Buet.

Nous participons activement au réseau Grand-Est des Sciences Cognitives, en particulier à travers une collaboration avec l'Université Louis Pasteur de Strasbourg sur le thème des modèles de mémoire. Cette collaboration donne également lieu à l'organisation de séminaires soutenus financièrement par le réseau.

8.2. Actions nationales

8.2.1. Exploitation de systèmes d'information géographique

Participants : Frédéric Alexandre, Mohammed Attik, Laurent Bougrain.

Dans le cadre d'une convention avec le bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) nous souhaitons établir des cartes de prédictivité de substances minérales à partir de systèmes d'information géographique (SIG). Plus précisément, les traitements doivent permettre de prédire, avec une fiabilité à estimer, la présence de gisements de métaux dans des endroits géoréférencés, mais aussi d'avoir une interprétation sur les critères

permettant d'établir cette décision afin d'améliorer les modèles géologiques. Nous sommes en train de développer un outil d'aide à la décision basé sur des outils statistiques et neuronaux, pour la visualisation et le traitement statistique des données géographiques. Nous avons commencé à utiliser cet outil sur une base de données du BRGM. Nous avons ainsi appliqué des techniques neuronales d'extraction de connaissances telles que les cartes auto-organisatrices de Kohonen et des réseaux de neurones dynamiques permettant d'identifier les catégories les plus représentatives et les variables les plus pertinentes, ainsi que des techniques de prédiction telles que les perceptrons multicouches permettant de prédire la probabilité d'appartenance a posteriori d'un site à une classe (gisement/non gisement, or/cuivre/argent/...). A terme, cette plate-forme sera adaptée pour que son utilisation soit facile pour des géologues.

8.2.2. Action de Recherche Coopérative NOSE

Participants : Frédéric Alexandre, Etienne Hugues, Dominique Martinez, Olivier Rochel.

Le problème principal de l'olfaction artificielle est le manque de sélectivité des capteurs de gaz. En effet, un tel capteur est soumis à une multitude de gaz susceptibles d'influencer son comportement et il paraît impensable qu'un capteur, même à terme, ne puisse interagir qu'avec un seul gaz. Nous cherchons donc à développer des algorithmes de traitement du signal capables d'accroître la sélectivité des systèmes de perception olfactive en combinant les réponses de plusieurs capteurs individuels. Avec NOSE (Neuromimetic Olfactory Sensing), une action de recherche coopérative de l'INRIA (janvier 2001 - Mai 2003), l'équipe vise deux objectifs originaux complémentaires. Le premier consiste à doter un robot de la capacité de percevoir des odeurs pour les localiser en remontant vers la source d'émission, à la manière de certains animaux comme l'abeille. Le second s'attache à progresser dans la connaissance de l'olfaction animale à l'aide d'une démarche de modélisation du système olfactif, qui permettra, dans un deuxième temps, d'appliquer ces résultats à la détection artificielle des odeurs. Les applications d'un tel projet visent à pouvoir intervenir dans des situations à risque (présence d'une fuite de gaz ou de produits dangereux dans un espace public ou encore dans un environnement hostile comme un champ de mines).

Pour l'aspect expérimental du projet nous avons collaboré avec des physiciens du LPMI de Nancy. Nous avons ainsi montré dans le cadre d'un environnement contrôlé que notre robot est capable de reconnaître et de quantifier une odeur lorsqu'il l'a apprise [16]. Nous espérons prochainement montrer, comme nous l'avons fait en théorie [11], que le robot est capable de remonter vers la source en dépit de la turbulence de l'air dans le cadre d'expériences réelles.

Pour l'aspect théorique du projet, nous avons collaboré avec des biologistes de l'Institut des Sciences Cognitives de Lyon. Le but est de construire un modèle olfactif inspiré de ce qu'il est chez l'animal avec la contrainte d'utiliser comme ingrédient de base des neurones impulsionnels, qui ont comme particularité de transmettre l'information à leur voisin de la même manière que les neurones biologiques qui émettent des potentiels d'action.

Avec le logiciel SIRENE que nous avons développé, nous avons en partie reproduit le codage spatio-temporel par synchronisation transitoire d'assemblées de neurones, observé expérimentalement par les biologistes. Nous porterons nos efforts en 2003 sur le fait de rendre ce modèle d'inspiration biologique compatible avec nos contraintes expérimentales (dynamique des capteurs et des odeurs).

8.2.3. Programme Interdisciplinaire Cognition et Traitement de l'Information du CNRS - Projet Aversion olfactive

Participant : Frédéric Alexandre.

Dans le cadre du projet "Réseaux et mécanismes de l'apprentissage : approche neurobiologique et computationnelle de l'aversion olfactive chez le rat" du programme interdisciplinaire "Cognition et traitement de l'information" du CNRS, nous collaborons avec le Laboratoire des Neurosciences Cognitives de Bordeaux et l'Institut des Sciences Cognitives de Lyon. Ce projet a démarré en décembre 2001 pour une durée de deux ans et vise à mettre en évidence les modifications du traitement des signaux olfactifs opérées dans des structures comme l'amygdale, le cortex et l'hippocampe lors de tâches de conditionnement aversif. Ceci devrait nous permettre de mieux comprendre la circuiterie sous-jacente et en tirer des mécanismes adaptatifs originaux.

8.2.4. Programme Interdisciplinaire Cognition et Traitement de l'Information du CNRS - *Projet Nez électronique*

Participants : Etienne Hugues, Dominique Martinez, Olivier Rochel.

Dans le cadre du projet "Dynamiques neuronales associées au traitement et à l'apprentissage d'une odeur - application à la mise au point d'un nez électronique" du programme interdisciplinaire "Cognition et traitement de l'information" du CNRS, nous collaborons avec trois équipes Lyonnaises : "Mécanismes physiologiques et cognitifs de la perception olfactive" de l'université Claude Bernard, "Neurobiologie de la mémoire olfactive" de l'ISC et "Signaux, Systèmes et physiques" de l'ENS. Ce projet a démarré en septembre 2002 pour une durée de deux ans et vise à poursuivre le travail de modélisation entrepris dans l'ARC NOSE (cf. § 8.2) en étudiant le rôle de l'apprentissage dans la formation du codage spatiotemporel. Nous espérons que les résultats obtenus dans ce projet, à la fois par la modélisation et l'expérimentation, permettront de concevoir des mécanismes d'apprentissage capables de compenser à la fois la non-sélectivité et les dérives des capteurs de gaz artificiels qui empêchent actuellement les 'nez électroniques' d'atteindre les performances du système olfactif animal, qui a pourtant des propriétés similaires.

8.2.5. *Projet Robéa du CNRS - Apprentissage de transformations visiomotrices*

Participants : Frédéric Alexandre, Hervé Frezza-Buet, Nicolas Rougier, Julien Vitay.

Ce projet, mené avec Supélec-Metz, l'INSERM-Paris et EDF-Chatou, consiste à s'inspirer de la façon dont le cortex répartit en différents modules le traitement des paramètres liés à l'asservissement des commandes corporelles motrices, pour proposer une architecture neuronale générique de contrôle robotique pouvant apprendre des asservissements complexes. L'application visée à moyen terme est d'assister un téléopérateur lors de la manipulation à distance de robots complexes, en prenant en charge pour lui les asservissements requis par les actions qu'il commande.

8.2.6. *Projet de l'Action Concertée Incitative Cognitive - Cognition spatiale*

Participant : Frédéric Alexandre.

Ce projet pluridisciplinaire, qui s'est achevé cette année et dont nous étions responsables, regroupait des équipes dans les domaines de l'informatique, de la biologie et de la psychologie. Il s'est intéressé à l'étude de codages catégoriels (relatifs) et métriques (absolus) de l'information visiospatiale et à leurs conséquences sur les performances des êtres humains et des modèles informatiques. Ces différents types de codages ont été étudiés au moyens d'expérimentations en IRMf sur des sujets humains et de modèles informatiques neuronaux d'inspiration biologique pour les aspects de représentation de l'information et d'inspiration statistique pour des études de complexité. Il en a résulté une meilleure connaissance de ces processus neuronaux, mais aussi une valorisation application dans le domaine de la psycho-pédagogie, pour les apprentissages scolaires.

8.2.7. *Projet de l'Action Concertée Incitative Cognitive - Action : Affordances et conception d'interface humain-machine : une approche esthétique de l'interaction*

Participant : Didier Fass.

Notre projet a pour but d'étudier le rôle des affordances (capacité des objets à suggérer des actions) sur le processus d'interaction humain-machine et de concevoir un modèle théorique prédictif des dynamiques d'interaction et des affordances, intégrant les aspects fonctionnels, issus des recherches et méthodes des sciences cognitives, d'une part, des principes et des règles du design artistique et d'expertise de spécialistes d'art et communication, appliqués au design des interfaces, d'autre part.

Ce projet est développé en partenariat avec la société EURISCO International spécialisée dans l'ingénierie cognitive et l'aéronautique et le département Info-Vidéo : Atelier édition électronique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Art de Nancy.

8.2.8. *Action spécifique du CNRS : Suppléance perceptive et interface*

Participants : Didier Fass, Hervé Frezza-Buet, Nicolas Rougier.

L'objectif principal de l'action Suppléance Perceptive et Interface est de fonder une ergonomie théorique qui doit permettre d'expliquer comment l'appropriation et les modifications des dispositifs de médiation (interface, dispositif de couplage) contraignent et rendent possible des activités cognitives (perceptives en particulier).

Méthodologiquement, il s'agit d'analyser et formaliser des phénomènes de constitution active de percepts nouveaux et ce, en fonction des propriétés manipulables des interfaces. Cette méthodologie générale se double d'une démarche comparative entre les effets des propriétés des interfaces saisies par des humains et les effets des propriétés des modalités de couplage d'artéfacts tel des robots. Ce projet impose l'interdisciplinarité, comme pratique de recherche, en mobilisant notamment sciences cognitives, ergonomie, ingénierie des interfaces, robotique, philosophie de la technique et anthropologie, à travers la dizaine des laboratoires participants.

8.2.9. Convention avec le Musée de La Villette

Participant : Jean-Charles Lamirel.

Ce projet étudie l'accès intelligent aux inventaires de collections muséologiques, avec à la fois l'intérêt de multiplier les regards de l'utilisateur et de faire découvrir des liens insoupçonnés aux historiens et à l'administrateur de la base de données "objets".

L'idée dont est issu ce projet est de coupler deux méthodes de classification et de fouille de données pour visualiser une collection d'objets, pour construire des points de vue sur ces données et des regroupements avec une granularité plus ou moins fine ou encore pour trouver des corrélations entre certaines propriétés de ces objets.

Cette approche est le fruit d'une collaboration dans le domaine des treillis de Gallois avec l'équipe Orpailleur.

8.3. Actions européennes

8.3.1. Projet IST MirrorBot

Participants : Frédéric Alexandre, Hervé Frezza-Buet, Olivier Ménard, Nicolas Rougier, Julien Vitay.

Ce projet de l'initiative européenne FET (Future Emergent Technology), qui a débuté en juin, regroupe l'INRIA-Lorraine, l'Université de Sunderland, l'Université de Parma, l'Université d'Ulm, et l'Unité Cognition and Brain Sciences de Cambridge. Son thème principal est l'apprentissage neuronal multimodal d'inspiration biologique pour un robot autonome agissant, percevant et se représentant le monde.

8.3.2. Réseau d'excellence NEUROCOLT II

Participants : Alistair Bray, Bernard Girau, Jean-Charles Lamirel, Dominique Martinez.

Ce réseau d'excellence européen, qui compte deux laboratoires membres en France, s'intéressait principalement à la théorie de l'apprentissage statistique. Les activités de ce réseau sont maintenant achevées (la réunion de synthèse finale s'est déroulée en Angleterre du 29 avril au 2 mai).

Nos contributions ont porté sur l'étude et les applications de différents modèles à support vecteur (SVM, support vector machines), sur un ensemble de modes de calcul connexionnistes dédiés aux implantations numériques, sur un apprentissage non supervisé pour la fouille de texte, et sur la séparation de sources non-linéaires[4].

8.3.3. Contrôle de machines industrielles

Participants : Frédéric Alexandre, Georges Schutz.

Ce projet européen de l'ECSC, dont nous sommes sous-traitants, regroupe les aciéries du Luxembourg, de Belgique et d'Espagne. Son but est d'améliorer le contrôle d'un four à arcs électriques par la modélisation du processus. Notre équipe a en charge la modélisation neuronale avec pour but l'extraction ou l'incorporation de connaissances expertes dans les réseaux neuronaux. Après avoir proposé une méthode non supervisée pour l'extraction d'indices robustes à partir des signaux recueillis par les capteurs du processus, nous nous sommes

intéressés cette année à la représentation et au traitement de séquences temporelles de tels indices à l'aide de techniques issues de la programmation dynamique et des cartes auto-organisatrices de Kohonen.

8.3.4. *Projet IST EICSTES*

Participant : Jean-Charles Lamirel.

Le but de ce projet européen IST est de définir des indicateurs et des méthodes pour l'analyse des données du Web. Les données visées par le projet concernent aussi bien les pages des sites Web institutionnels européens que les fichiers de logs associés aux différents serveurs et services proposés par les institutions. Le projet couvre un large domaine de compétences puisqu'il fait intervenir à la fois des statisticiens, des sociologues de l'information et des informaticiens.

La méthode MicroNOMAD-MultiSOM fait partie des deux méthodes de référence du projet. Après avoir fait évoluer celle-ci en la rendant plus générique pour l'adapter au traitement des données Web, nous avons montré qu'elle était particulièrement adaptée au traitement du contenu textuel des pages Web. Nous travaillons actuellement avec des sociologues de l'information afin de croiser les résultats d'analyse co-référentielle obtenus avec l'autre méthode de référence du projet (ARCS) avec les résultats d'analyses thématiques obtenus par notre méthode.

Une deuxième tâche qui nous concerne dans ce projet est celle d'établir un état de l'art des différentes méthodes de visualisation dont peuvent disposer les analystes de l'information. Le panorama des méthodes qu'il est demandé d'étudier dépasse largement le cadre des méthodes neuronales. Ce travail de large portée est actuellement en cours et devrait pouvoir aboutir au terme d'une année à la publication d'un livre de référence sur le sujet.

8.3.5. *Projet IST Scholnet*

Participant : Jean-Charles Lamirel.

Le but du projet Scholnet est de définir un environnement support pour le développement d'une librairie électronique multimédia distribuée à usage académique. En sus des services traditionnels d'accès à des informations textuelles distantes, tels que des publications ou tout autre type de document scientifique ou technique, l'environnement devra permettre de mettre en place des services d'accès aux informations non textuelles telles que les images ou les vidéos, ainsi que des services d'annotation hypermedia, de recherche multilingue, de distribution personnalisée d'information.

Ce projet étend l'environnement proposé par le projet Européen ERTDL pour l'accès aux documents textuels académiques basé lui-même sur le protocole DIENST d'accès aux documents distribués.

Notre rôle est de proposer une méthode de représentation unifiée des documents vidéo, ainsi que des méthodes d'accès élaborées à ces mêmes documents. Nous interviendrons également dans la construction des profils utilisateurs ainsi que dans la conception des services de distribution personnalisés de l'information. Nous intervenons enfin dans l'évaluation du prototype final et la dissémination d'information sur les résultats du projet.

Ce projet a démarré en Novembre 2000. La version définitive du prototype sera présentée en début d'année 2003 lors de l'avant dernière revue du projet. La phase d'évaluation du projet devrait couvrir le reste de la durée du projet.

8.4. **Actions internationales**

8.4.1. *Projet STIC avec la Tunisie*

Participants : Frédéric Alexandre, Laurent Bougrain.

Nous travaillons avec la faculté de médecine de Monastir sur l'interprétation de signaux physiologiques (EEG, EMG, EOG). D'une part, une telle interprétation peut permettre de mieux détecter des changements dans des états de vigilance. Notre but est alors de la réaliser avec un système connexionniste compact pouvant facilement être embarqué dans un FPGA et porté de façon autonome par un humain effectuant des tâches à

risque. D'autre part, nous étudions avec des médecins physiologistes, de manière plus fondamentale, la mise au point d'outils logiciels permettant de mieux comprendre le sommeil et ses pathologies associées.

8.4.2. Action conjointe INRIA-NSC Taiwan

Participant : Jean-Charles Lamirel.

Le domaine d'application de ce projet est celui d'une librairie électronique multimédia comprenant à la fois du texte et des images accessibles en ligne sur internet. Le but du projet final est de proposer à la fois des fonctionnalités d'accès par requête ainsi que des fonctionnalités d'accès à partir d'exemples à la librairie. Les contraintes d'adjonction incrémentale de nouveaux documents, texte ou image, à la base originale doivent également être prises en compte. De même, ce projet doit également tenir compte de contraintes liées à un temps de calcul réaliste des solutions.

Cette approche est basée à la fois sur l'approche MicroNOMAD, ainsi que sur les méthodes de calcul de similarité dans des espaces vectoriels fortement multidimensionnels développés dans l'équipe.

Nous avons proposé un premier modèle théorique de cette approche. L'implantation opérationnelle est en cours de réalisation et devrait aboutir cette année.

9. Diffusion des résultats

9.1. Animation de la Communauté scientifique

- Responsabilité du Réseau Grand-Est des Sciences Cognitives (F. Alexandre)
- Participation active à des groupes de travail : Neurocolt (*cf.* § 8.3), Association NSI (Neurosciences et Sciences pour l'Ingénieur)
- Relecture pour les revues : International Journal of Neural Systems, IEEE Trans. SMC Parallel Computing, TSI (F. Alexandre), IEEE Trans. on Neural Network (B. Girau).
- Participation au comité scientifique des journées NSI'02 ;
- Conférence invité à la conférence « Apprentissage », Ministère de la Recherche, 9-10/12/02 (F. Alexandre).
- Participation de l'équipe à l'exposition Exponancier, à Nancy, du 14 oct. au 17 nov.
- Participation au Neuromorphic Workshop à Telluride (USA) du 1 au 10 juillet (rapport disponible sur <http://www.ini.unizh.ch/telluride>)

9.2. Enseignement

- Participation à divers enseignements en informatique à Nancy et à Strasbourg (DEA, DESS, IUT, Licence-Maîtrise d'informatique) ;
- Enseignement au DEA de Neurosciences de Strasbourg et au DEA de Sciences Cognitives de Lyon (F. Alexandre), enseignement au CNAM (B. Girau, E. Hugues) ;
- Participation à des jurys de thèse (F. Alexandre, D. Martinez, J.C. Lamirel) ;
- Co-encadrement de thèses au LAAS (D. Martinez) et en Tunisie (J.-C. Lamirel, F. Alexandre).

10. Bibliographie

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [1] D. FASS. *Base de connaissances multimodales et esthétique de la connaissance, aide à l'action et réalité virtuelle : théorie et expérience*. Thèse d'université, Université Henri Poincaré - Nancy 1, décembre, 2002.

Articles et chapitres de livre

- [2] F. ALEXANDRE. *Extraction d'invariants et prise en compte de la variabilité dans les réseaux de neurones artificiels*. éditeurs J. LAUTREY., in « Invariants et variabilité dans les sciences cognitives », série Cognitive, Éditions de la Maison des sciences de l'homme, octobre, 2002.
- [3] H. FREZZA-BUET, F. ALEXANDRE. *From a biological to a computational model for the autonomous behavior of an animat*. in « Information Sciences », numéro 1-4, volume 144, juillet, 2002, pages 1-43.
- [4] D. MARTINEZ, A. BRAY. *Nonlinear blind source separation using kernels*. in « IEEE Transactions on Neural Networks », décembre, 2002.
- [5] J.-F. REMM, F. ALEXANDRE. *Knowledge extraction using artificial neural networks : Application to radar target identification*. in « Signal Processing », volume 82, 2002, pages 117-120.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [6] F. ALEXANDRE. *Different Levels of Time for Artificial Models and Biological Mechanisms*. in « Workshop , Edinburgh , UK », éditeurs T. PRESCOTT, B. WEBB., août, 2002.
- [7] A. BERMAK, M. HOPFINGER, D. MARTINEZ. *Image segmentation using Spiking Pixel Architecture*. in « Special session on Next Generation Image Sensors for Multimedia applications - SCI'2002, Orlando, Florida, USA », juillet, 2002.
- [8] L. BOUGRAIN. *A pruned higher-order network for knowledge extraction*. in « International Joint Conference on Neural Networks - IJCNN'02, Honolulu, Hawaii, USA », mai, 2002, <http://www.loria.fr/publications/2002/A02-R-167/A02-R-167.ps>.
- [9] A. BRAY. *An Adaptive Hierarchical Model of the Ventral Visual Pathway Implemented on a Mobile Robot*. in « 2nd Workshop on Biologically Motivated Computer Vision - BMCV'02, Buebingen, Germany », novembre, 2002.
- [10] A. BRAY, D. MARTINEZ. *Kernel-based extraction of Slow Features : Complex cells learn disparity and translation invariance from natural images*. in « Neural Information Processing Systems - NIPS'02, Vancouver, Canada », décembre, 2002.
- [11] E. HUGUES, N. GINDER, D. MARTINEZ. *Etude de lois de navigation pour la recherche de sources de gaz*. in « XIèmes journées Neurosciences et Sciences pour l'Ingénieur, NSI'2002, La Londe les Maures, France », septembre, 2002, <http://www.loria.fr/publications/2002/A02-R-496/A02-R-496.ps>.
- [12] E. HUGUES, F. GUILLEUX, O. ROCHEL. *Contour Detection by Synchronization of Integrate-and-Fire Neurons*. in « 2nd Workshop on Biologically Motivated Computer Vision - BMCV 2002, Tübingen, Allemagne », série Lecture Notes in Computer Science, volume 2525, Max Planck Institute for Biological Cybernetics, Springer-Verlag, éditeurs H. BÜLTHOFF, S.-W. LEE, T. POGGIO, C. W. (EDS.), pages 60-69, novembre, 2002.
- [13] J.-C. LAMIREL, Y. TOUSSAINT. *Association de méthodes symboliques et numériques pour l'analyse du*

contenu de bases de données. in « 13ème Congrès Francophone AFRIF-AFIA de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle - RFIA'2002, Angers, France », janvier, 2002.

- [14] D. MARTINEZ, A. BRAY. *Kernel Temporal Component Analysis (KTCA)*. in « European Symposium on Artificial Neural Networks - ESANN'2002, Bruges, Belgium », pages 477-482, avril, 2002.
- [15] D. MARTINEZ. *Une introduction aux machines à vecteurs supports (Support Vector Machines)*. in « XIèmes Journées Neurosciences et Sciences pour l'Ingénieur - NSI'02, La Londe Les Maures, France », septembre, 2002.
- [16] O. ROCHEL, D. MARTINEZ, E. HUGUES, F. SARRY. *Stereo-olfaction with a sniffing neuromorphic robot using spiking neurons*. in « 16th European Conference on Solid-State Transducers - EUROSENSORS, Prague, Czech Republic », septembre, 2002, <http://www.loria.fr/publications/2002/A02-R-139/A02-R-139.ps>.
- [17] O. ROCHEL, D. MARTINEZ. *Un modèle générique de neurone impulsionnel adapté à la simulation événementielle*. in « XIèmes Journées Neurosciences et Sciences de l'Ingénieur - NSI'02, La Londe Les Maures, France », septembre, 2002, <http://www.loria.fr/publications/2002/A02-R-140/A02-R-140.ps>.
- [18] B. SCHERRER, F. CHARPILLET. *Coevolutive Planning In Markov Decision Processes*. in « First International Joint Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems - AAMAS 2002, Palazzo Re Enzo, Bologna, Italy », juillet, 2002.
- [19] B. SCHERRER, F. CHARPILLET. *Cooperative Co-learning : A Model-based Approach for Solving Multi Agent Reinforcement Problems*. in « 14th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence - ICTAI 2002, Washington, USA », IEEE, novembre, 2002.
- [20] B. SCHERRER. *A connectionist architecture that adapts its representation to complex tasks*. in « International Joint Conference on Neural Networks - IJCNN 2002, Hilton hawaiian Village, Honolulu, HI », mai, 2002.