

Avant-projet CORTEX

Intelligence neuromimétique

Nancy

THÈME 3A



*R*apport
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.1	Le connexionnisme	5
3.2	L'intégration neurosymbolique	5
3.3	Modélisation biologique	6
4	Domaines d'applications	7
4.1	Panorama	7
4.2	Représentation de l'information	7
4.3	Tâches cognitives	8
4.4	Architectures dédiées	8
5	Logiciels	9
5.1	Plates-formes de développement	9
5.2	Simulateurs d'environnements	9
5.3	Interface avec le robot Koala	9
5.4	Implantation de modèles	10
5.5	Bibliothèque Neuronale	10
6	Résultats nouveaux	10
6.1	Représentation interne distribuée	10
6.2	Stratégies d'exploitation	11
6.3	Implantations matérielles	12
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	13
7.1	Classification d'environnements	13
8	Actions régionales, nationales et internationales	13
8.1	Actions régionales	13
8.1.1	Collaboration avec l'INIST	13
8.1.2	Collaboration avec Supélec sur le parallélisme	13
8.1.3	Collaboration avec Supélec sur la robotique autonome	13
8.1.4	Réseau Grand-Est des Sciences de la Cognition	14
8.2	Actions nationales	14
8.2.1	Projet du GIS Sciences de la Cognition	14
8.2.2	Projet de l'Action Concertée Incitative Cognitive	14
8.2.3	Neurophysiologie cognitive	14
8.2.4	Bioinformatique	15
8.2.5	Lecture de codes barre matriciels	15
8.3	Actions européennes	15

8.3.1	Réseau d'excellence NEUROCOLT II	15
8.3.2	Programme d'Actions Intégrées Van Gogh	15
8.3.3	Contrôle de machines industrielles	16
9	Diffusion de résultats	16
9.1	Animation de la Communauté scientifique	16
9.2	Enseignement	16
10	Bibliographie	17

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.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Frédéric Alexandre [Chargé de Recherche INRIA]

Assistante de projet

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

Personnel CNRS

Dominique Martinez [CR]

Personnel Université

Yann Guermeur [Maître de Conférences, UHP (à partir du 1/2/99)]

Jean-Charles Lamirel [Maître de Conférences, U. Strasbourg]

Chercheurs doctorants

Yann Boniface [ATER (à partir du 1/9/99)]

Laurent Bougrain [CNRS]

Didier Fass [CNES]

Bernard Girau [doctorant de l'ENS-Lyon (jusqu'au 1/11/99)]

Karima Ouchérif [INRIA (à partir du 1/11/99)]

Nicolas Rougier [MENRT]

Bruno Scherrer [INRIA (à partir du 1/10/99)]

Chercheurs post-doctorants

Reda Berrah [ATER (jusqu'au 1/9/99)]

Alistair Bray [INRIA (jusqu'au 1/9/99)]

Hervé Frezza-Buet [ATER (à partir du 1/10/99)]

Collaborateur extérieur

Stéphane Vialle [Chef de travaux à Supélec]

2 Présentation et objectifs généraux

Notre équipe s'intéresse à l'étude de modèles numériques, distribués et adaptatifs pour la réalisation de systèmes "intelligents", c'est-à-dire capables d'extraire de la connaissance à partir de données (*cf.* § 6.1) et de manipuler cette connaissance pour résoudre des problèmes (*cf.* § 6.2). 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. D'une part, nous élaborons un modèle cortical d'inspiration biologique (*cf.* § 3.3) incluant des aspects de perception, d'association multimodale et de raisonnement. D'autre part, nous étudions l'adaptation et la coopération de modèles classiques du connexionnisme et de l'intelligence artificielle dans la perspective de l'intégration neurosymbolique (*cf.* § 3.2).

Nous privilégions la voie neuromimétique pour plusieurs raisons. Elle possède intrinsèquement de fortes capacités adaptatives; elle permet d'éviter l'écueil de l'ancrage perceptif, par son approche ascendante; elle donne un accès très riche aux données et aux modèles des neurosciences cognitives qui étudient l'intelligence animale et humaine selon cette même voie neuromimétique.

En particulier, ce domaine d'inspiration nous indique que l'une des caractéristiques essentielles de l'intelligence est de permettre de donner des réponses satisfaisantes alors que le sujet 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 (*cf.* § 7.1), la robotique (*cf.* § 8.2), la conduite de processus industriels (*cf.* § 8.3) et l'aide à la décision (*cf.* § 3.2). 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.

Le défi majeur posé par nos recherches est celui de la maîtrise du phénomène d'émergence inhérent à cette approche. 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 sera obtenue par émergence, comme résultat de l'interaction de l'ensemble de ces unités distribuées. Nous contrôlons ce phénomène en adoptant une approche modulaire (stratégie également décrite par nos domaines d'inspiration des sciences du vivant) qui permet de construire progressivement, par étapes, la fonction recherchée. Cela nous amène, à un niveau macroscopique, à structurer nos systèmes en deux niveaux. Tout d'abord, nous faisons émerger une représentation interne distribuée du monde extérieur (*cf.* § 6.1), à partir d'une étude statistique non supervisée permise par des modèles connexionnistes. Ensuite, nous manipulons et explorons cette connaissance extraite (*cf.* § 6.2), à des fins de raisonnement ou d'aide à la décision selon des voies connexionnistes ou symboliques.

Soulignons enfin trois thèmes importants au centre de nos recherches.

(i) L'autonomie : nos systèmes doivent apprendre à réaliser leur tâche sans connaissance a priori

et sans aide extérieure. On conçoit par exemple l'intérêt de cette propriété pour la navigation d'un robot dans un environnement inconnu ou changeant.

(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 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 nos 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 de Kohonen. Ces modèles ont été largement étudiés sous l'angle de leurs capacités d'apprentissage et de leurs similitudes avec des classifieurs 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).

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 classifieurs. 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 classifieurs.

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 s'inspirer des sciences du vivant et de développer des modèles de neurosciences computationnelles (*cf.* § 3.3).

3.3 Modélisation biologique

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

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 et d'un niveau plus fonctionnel 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. Dans les aires sensorielles, elles détectent des événements perceptifs élémentaires et dans les aires motrices des événements moteurs. Dans les aires associatives, elles mesurent des coïncidences d'apparition entre événements sensoriels et/ou moteurs. Dans les aires frontales, elles organisent temporellement le déclenchement des événements élémentaires représentés dans les aires associatives, sensorielles ou motrices.

Utiliser un tel cadre à des fins de traitement automatique de l'information implique d'établir comment la mise au point de réseaux de telles unités permet d'agir à deux niveaux, d'une part celui de la représentation de l'information et d'autre part celui de la réalisation de tâches complexes.

Représentation de l'information 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.

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

Réalisation de tâches 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 et en particulier concernant 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.

4 Domaines d'applications

4.1 Panorama

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

Résumé : *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.* § 7.1, § 8.2 et § 8.1) qui, à partir de bases de données de grande taille (géographiques, génomiques ou bibliographiques), proposent une structuration et une exploitation raisonnée des connaissances implicitement disponibles.

4.3 Tâches cognitives

Dans notre perspective cognitive des modèles neuromimétiques, nous investissons la modélisation de comportements cognitifs typiquement humains. Après les tâches perceptives et associatives étudiées dans le passé, nous cherchons maintenant à modéliser des comportements de planification d'actions permettant de satisfaire des besoins directement exprimés (*cf.* § 8.2). Cela se traduit actuellement par des tâches de navigation et de décision appliquées au comportement de robot.

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, 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.).

Nous nous intéressons également, dans le cadre du centre Charles Hermite, à l'implantation de nos modèles sur des machines parallèles classiques de type MIMD. 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 Plates-formes de développement

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

Mots clés : plate-forme de développement, modèles neuronaux.

Une grande part des travaux de l'équipe repose sur la programmation d'automates distribués (colonnes corticale, neurones impulsions, 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. Cette plate-forme est en cours d'extension sur machine parallèle à l'aide de la bibliothèque neuronale parallèle développée au sein de notre équipe.

5.2 Simulateurs d'environnements

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

Mots clés : interface de simulation, comportement autonome.

Plusieurs outils de simulation de robot ont été conçus dans notre équipe. Le premier a été développé dans le cadre du projet GIS (*cf.* § 8.2) pour tenir compte des contraintes communes définies par l'ensemble des équipes participantes. Ce simulateur est maintenant utilisé pour d'autres applications (étude de modèles de cortex frontal). Par ailleurs, un deuxième simulateur a été développé à l'aide de la bibliothèque OpenGL afin d'obtenir des environnements complexes (luminosité, ombres, textures). Enfin, les sorties du logiciel de traitement d'image ont fait l'objet d'une émulation au sein d'un troisième simulateur, plus spécifique à nos modèles d'interaction hippocampe/cortex, qui reposent sur ce traitement d'image.

5.3 Interface avec le robot Koala

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

Mots clés : comportement autonome.

Nous avons 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. Une couche logicielle (bibliothèque GDK/GTK) autorisant le contrôle interactif du robot est désormais disponible pour l'interfaçage de nos modèles neuromimétiques.

5.4 Implantation de modèles

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

Mots clés : interface de simulation, modèles cérébraux.

Suite à l'implantation du modèle de cortex associatif réalisé l'année dernière, nous avons mené une expérience permettant de valider notre modèle de cortex frontal. L'implantation de cette expérience a permis de mettre en avant les aptitudes de planification de ce modèle. D'autre part, la modélisation de la structure de l'hippocampe a donné lieu à la mise au point de protocoles expérimentaux et à leur implantation logicielle effective. De plus l'implantation de ce modèle d'hippocampe pour une tâche de cartographie de l'environnement a permis de souligner les principes d'interaction entre hippocampe et cortex. Enfin, dans l'optique d'une migration des modèles sur un robot réel, nous avons développé des applications de traitement d'images sur une base de modélisation corticale.

5.5 Bibliothèque Neuronale

Participants : Yann Boniface [correspondant], Laurent Bougrain, Stéphane Vialle.

Mots clés : parallélisme, MIMD.

Cette bibliothèque 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.

En collaboration avec Olivier Rochel (stagiaire Supélec), nous avons développé une bibliothèque graphique permettant de visualiser les réseaux construits à l'aide de notre bibliothèque neuronale. En utilisation parallèle, cette bibliothèque graphique utilise le *pipe* graphique du Centre Charles Hermite, qui permet d'user de la puissance du parallélisme et des atouts de la visualisation graphique.

Du point de vue des développements logiciels, cette bibliothèque a été utilisée cette année pour développer les algorithmes de Growing Neural Gas et de OWE dans le cadre d'une application aux télécommunications (*cf.* § 7.1).

6 Résultats nouveaux

6.1 Représentation interne distribuée

Participants : Frédéric Alexandre, Laurent Bougrain, Hervé Frezza-Buet, Yann Guermeur, Jean-Charles Lamirel, Dominique Martinez, Nicolas Rougier.

Nous évoquons ici les mécanismes élémentaires que nous avons étudiés cette année en vue

de nous donner différents accès pour la représentation et le traitement de l'information par le formalisme connexionniste.

En ce qui concerne les modèles classiques du connexionnisme, nous avons tout d'abord poursuivi notre étude de modèles neuronaux permettant des partitions de l'espace [3], aussi bien pour des applications aux télécommunications (*cf.* § 7.1) qu'à l'infométrie (*cf.* § 8.1). Cette partition peut ensuite permettre des études spécialisées selon des critères de performance ou de relation spatiale. Pour réaliser ces tâches, nous avons utilisé des modèles comme les réseaux non supervisés, les réseaux récurrents ou les SVM. Sur ce dernier point, nous débutons une étude permettant des fonctions de discrimination multiclassées. Afin de mieux comprendre l'information spécialisée ainsi extraite, nous implantons actuellement des techniques d'élagage de réseaux, en utilisant en particulier notre bibliothèque adaptée aux machines parallèles (*cf.* § 5.5).

En ce qui concerne les modèles d'inspiration biologique, nous avons tout d'abord développé un nouveau modèle d'unité bistable, en s'inspirant du cortex frontal, structure connue pour son rôle dans les tâches de planification. Nous avons également proposé des règles d'apprentissage et de fonctionnement [21] permettant à de telles unités d'avoir une activité soutenue et de gérer ainsi des piles de buts et de sous-but. Nous avons ensuite poursuivi notre étude sur un modèle d'hippocampe, permettant de réaliser des mémoires déclaratives de faits précis, de manière complémentaire à la mémoire procédurale de fonctions, généralement réalisée par les modèles corticaux. Nos études bibliographiques nous ont donc amenés à réaliser des réseaux permettant la dispersion, la compression, le rappel et la comparaison d'informations distribuées, toutes ces fonctions intervenant dans la réalisation de ce type de mémoire déclarative. Nous évaluons actuellement les capacités de stockage de ces réseaux à l'aide d'exemples simples.

6.2 Stratégies d'exploitation

Participants : Frédéric Alexandre, Laurent Bougrain, Hervé Frezza-Buet, Jean-Charles Lamirel, Nicolas Rougier.

Nous présentons ici les aspects de communication et de décision que nous avons été amenés à étudier afin de réaliser des systèmes complets et intégrés, exploitant les mécanismes élémentaires présentés au § 6.1.

En ce qui concerne les modèles classiques du connexionnisme, nous avons poursuivi le développement de plates-formes informatiques permettant l'exploration de grandes bases de données pour l'infométrie (*cf.* § 8.1) et les télécommunications (*cf.* § 7.1). Sur le premier point, des classifications multicritères nous permettent de naviguer dans des bases de données selon plusieurs points de vue. Le système de conjonction de cartes que nous avons développé nous offre un outil de découverte d'informations en cours d'évaluation. Sur le second point, nous avons approfondi nos techniques d'apprentissage commun de systèmes de prédiction spécialisés concurrents, en utilisant la prédiction (ou d'autres critères de classe) de points voisins pour affiner la prédiction en un point, considéré en fonction de son contexte spatial [12].

En ce qui concerne les modèles d'inspiration biologique, nous avons poursuivi la réalisation de notre plate-forme informatique permettant la navigation d'un agent autonome en utilisant des logiciels de simulation tels que ceux présentés au § 5.2. Nous avons d'une part couplé notre

modèle de cortex frontal [1], permettant la planification et la gestion des buts, au modèle de cortex associatif réalisé l'année dernière, permettant l'asservissement de l'agent autonome. Il en résulte un système souple et extensible, capable de gérer plusieurs critères et d'organiser son comportement au sein d'une mémoire de travail distribuée [15]. D'autre part, nous débutons des études pour le couplage de notre modèle d'hippocampe, vu comme une mémoire déclarative, au modèle de cortex associatif, vu comme une mémoire procédurale [20]. A terme, ce couplage devrait permettre d'organiser le comportement en utilisant conjointement un apprentissage statistique pour la coordination sensorimotrice et un apprentissage épisodique de faits et d'événements passés [21].

6.3 Implantations matérielles

Participants : Frédéric Alexandre, Yann Boniface, Laurent Bougrain, Bernard Girau, Dominique Martinez, Stéphane Vialle.

Dans le domaine de la parallélisation à grain fin, les contraintes de taille et de topologie des supports matériels programmables nous ont amenés notamment à proposer une nouvelle approche de réalisation des connexions neuronales, au moyen d'un protocole de partage des connexions disponibles par un nombre important de connexions virtuelles [22]. Nous en avons fait une étude à la fois théorique et appliquée : modèle général, principes de calculs, conditions de terminaison et de non-interblocage, déterminisme, apprentissage, initialisation, schémas d'implantation avec ou sans apprentissage, implantation avec pipeline, application à différents benchmarks [23]. L'intérêt principal de cette approche est de permettre une gestion des graphes de connexions des modèles neuronaux compatibles avec les contraintes des implantations matérielles [17]. Ce travail peut donc être appliqué à une grande variété de modèles neuronaux.

Pour ce qui concerne la parallélisation à gros grain, nous avons achevé le développement d'une bibliothèque 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 [9]. L'implantation de différents types de réseaux connexionnistes nous a permis de constater que notre outil facilite l'utilisation du parallélisme intrinsèque des réseaux de neurones et qu'il masque parfaitement le parallélisme hardware [10]. En termes de performances, un programme utilisant notre librairie est plus lent qu'une implantation séquentielle classique lorsqu'il est exécuté sur un seul processeur, et plus rapide à partir de deux processeurs. A titre d'exemple, notre implantation de la carte de Kohonen est sept fois plus rapide sur huit processeurs que sur un seul. Nous évaluons également les performances et la facilité d'utilisation de notre bibliothèque en la mettant au service des grosses applications que nous réalisons. C'est ainsi que nous l'utilisons actuellement, en calcul intensif, pour le dimensionnement de nos plates-formes multiréseaux de l'application aux télécommunications (*cf.* § 7.1) et sur des aspects de synchronisation de tâches pour nos modèles d'inspiration biologique.

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

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Classification d'environnements

Participants : Frédéric Alexandre, Laurent Bougrain.

Dans le cadre d'une convention avec le CNET, nous testons nos modèles neuronaux sur un difficile problème d'analyse de bases de données géographiques. Nous avons commencé par établir des stratégies de combinaison de classifieurs à partir de variables hétérogènes. Nous y avons ensuite introduit des contraintes de topologie et de continuité entre classes. De tels systèmes sont aujourd'hui utilisés par France Télécom pour l'aide au positionnement des antennes émettrices pour le téléphone mobile.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions régionales

8.1.1 Collaboration avec l'INIST

Participants : Frédéric Alexandre, Jean-Charles Lamirel.

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.

8.1.2 Collaboration avec Supélec sur le parallélisme

Participants : Frédéric Alexandre, Yann Boniface, Stéphane Vialle.

L'implantation parallèle de nos modèles permet l'accélération de la convergence de nos réseaux. Elle permet également d'étudier plus finement divers paradigmes de communication entre unités. Nous avons évalué différentes formes de parallélisation (par envoi de message et par partage de mémoire) appliquées aux modèles classiques et d'inspiration biologique que nous développons. Ceci nous a permis de développer un outil d'aide à la parallélisation pour réseaux de neurones. Ces travaux ont été implantés sur les machines parallèles du Centre Charles Hermite.

8.1.3 Collaboration avec Supélec sur la robotique autonome

Participants : Frédéric Alexandre, Hervé Frezza-Buet, Bruno Scherrer, Stéphane Vialle.

La thèse de Bruno Scherrer se déroule dans le cadre d'une collaboration avec Supélec et avec les équipes CORTEX et MAIA du LORIA. L'aspect fondamental de ce travail consistera

à étudier des possibilités de couplage entre un système neuronal et un système markovien. Ces développements seront appliqués à la réalisation d'agents robotiques autonomes et coopératifs.

8.1.4 Réseau Grand-Est des Sciences de la Cognition

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

Nous participons activement au réseau Grand-Est des Sciences de la Cognition, en particulier à travers une collaboration avec l'ULP de Strasbourg sur le thème des modèles de mémoire et avec le GRIPIC (groupement scientifique nancéen) sur le thème de l'interaction. Ces deux collaborations donnent également lieu à l'organisation de séminaires soutenus financièrement par le réseau.

8.2 Actions nationales

8.2.1 Projet du GIS Sciences de la Cognition

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

Le but de ce projet, qui s'est achevé en 1999, était de permettre à un robot réel ou simulé de maintenir un certain nombre de variables essentielles à sa viabilité. Nous sommes donc passés par les deux étapes de construction d'une représentation interne de l'environnement perçu et de mise au point de stratégie d'exploitation, par un formalisme neuronal d'inspiration biologique. Nous avons développé cette architecture de concert avec trois autres équipes françaises, et avons ensuite comparé les apports respectifs des diverses méthodes.

8.2.2 Projet de l'Action Concertée Incitative Cognitive

Participants : Frédéric Alexandre, Hervé Frezza-Buet, Karima Oucherif, Nicolas Rougier.

Ce projet pluridisciplinaire, dont nous sommes responsables, regroupe des équipes dans les domaines de l'informatique, de la biologie et de la psychologie. Il s'intéresse à l'étude de codages catégoriels et métriques de l'information visiospatiale et à leurs conséquences sur les performances des êtres humains et des modèles informatiques. Il verra donc le développement en parallèle de protocoles qui seront appliqués à des modèles informatiques d'inspiration biologique et statistique, à des tests de psychopédagogie et à des expérimentations en IRMf pour des sujets humains.

8.2.3 Neurophysiologie cognitive

CONVENTION AVEC LE CNES, LE PES ET LE LABORATOIRE DE PHYSIOLOGIE DE L'UHP

Participant : Didier Fass.

Notre recherche porte sur les fondements neurophysiologiques de la connaissance dans le but d'applications aux systèmes à base de connaissance pour l'aide à l'activité humaine (aide à la décision, aide au geste...) Nous réfléchissons à la définition de protocoles de perception et

d'action de l'espace et à leurs retombées cognitives. La mise au point de ce protocole passe par la conception d'environnements de réalité virtuelle et par des expérimentations en IRM pour les aspects les plus fonctionnels. Dans le cadre de ces recherches nous avons participé à la campagne de vol parabolique n°8 CNES-SPACEHAB (avec Nicolas Rougier).

8.2.4 Bioinformatique

Participant : Yann Guermeur.

A la suite de la thèse de Yann Guermeur, ayant eu pour domaine d'application la prédiction de la structure secondaire des protéines globulaires, nous développons actuellement des collaborations avec des laboratoires de Lyon, Nancy et Strasbourg, dans le but d'appliquer des modèles numériques à diverses tâches en bioinformatique. Ces travaux concernent en particulier la biologie structurale prédictive (structures secondaires et tertiaires), ainsi que la recherche des introns et exons dans les génomes.

8.2.5 Lecture de codes barre matriciels

COLLABORATION AVEC LE LAAS ET LA SOCIÉTÉ INTERMEC

Participant : Dominique Martinez.

Le but de ce projet est de réaliser un microsystème pour la détection et la localisation en temps réel d'objets visuels sur la base d'un empilement en trois dimensions de plusieurs niveaux de traitement : (i) une rétine CMOS de 512x512 pixels, (ii) un prétraitement analogique adaptatif où sont conjointement combinées conversion A/D et égalisation d'histogramme, (iii) un traitement digital où l'organe responsable de la décision est implanté sous la forme d'une machine à vecteurs support.

8.3 Actions européennes

8.3.1 Réseau d'excellence NEUROCOLT II

Participants : Bernard Girau, Dominique Martinez, Yann Guermeur.

Ce réseau d'excellence européen, qui compte deux laboratoires membres en France, s'intéresse principalement à la théorie de l'apprentissage statistique. Ceci concerne donc les aspects les plus théoriques de nos travaux. Notre contribution porte essentiellement sur l'étude de la discrimination multi-classes. Dans ce domaine, nos recherches couvrent l'ensemble du spectre de la théorie, allant de l'établissement de lois fortes des grands nombres uniformes à la mise en œuvre du principe inductif de minimisation structurelle du risque (conception de SVM).

8.3.2 Programme d'Actions Intégrées Van Gogh

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

Dans le cadre du PAI Van Gogh, nous collaborons avec l'Université d'Amsterdam sur la modélisation des interactions entre l'hippocampe et le cortex. Le but de ce projet est de faire

une synthèse entre les deux types de modèles développés sur les deux sites et de les appliquer ensuite à une tâche de navigation de robot autonome.

8.3.3 Contrôle de machines industrielles

Participants : Frédéric Alexandre, Dominique Martinez.

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.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la Communauté scientifique

- Participation active à des groupes de travail : Neurocolt (*cf.* § 8.3), GRIPIC (Groupe de recherche sur l'interaction), Association NSI (Neurosciences et Sciences pour l'Ingénieur), GTRA (groupe de travail AFIA sur l'apprentissage)
- Comités de lecture de revues : Neurocomputing, International Journal of Neural Systems (F. Alexandre).
- Expertises pour le NWO (Pays-Bas) et le FWF (Autriche) (F. Alexandre);
- Comités de programme : Conférence sur l'Intelligence Artificielle Située (IAS99), Paris 25-28 Octobre 1999; Workshop Biologically-inspired Machine Learning (BIML), a workshop during ACAI-99, July 1999, Crete, Greece; journées de la SFC (Société Francophone de Classification), Nancy 15-18 Septembre 1999 (F. Alexandre);
- Participation à l'exposition "Mille cerveaux, Mille mondes" au muséum d'histoire naturelle de Paris (du 6 octobre 1999 au 10 juillet 2000).
- Prix de la meilleure présentation orale à l'Int. Joint Conf. on Neural networks pour [12].

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 Nancy et de Strasbourg (F. Alexandre);
- Enseignement au Séminaire annuel de la Société Française de Pharmacologie (novembre 1999) sur le thème de la mémoire (F. Alexandre);
- Cours sur le thème "Capteurs intelligents par réseaux de neurones" à l'Institution of Electrical Engineers, Londres (D. Martinez);
- Participation à des jurys de thèse (F. Alexandre, D. Martinez);
- 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] H. FREZZA-BUET, *Un modèle de cortex pour le comportement motivé d'un agent neuro-mimétique autonome*, Thèse d'université, Loria, Nancy, octobre 1999.
- [2] B. GIRAU, *Du parallélisme des modèles connexionnistes à leur implantation parallèle*, Thèse ens lyon, ENS Lyon, mars 1999.

Articles et chapitres de livre

- [3] L. BOUGRAIN, F. ALEXANDRE, « Unsupervised Connectionist Algorithms for Clustering an environmental data set : a comparison », *Neurocomputing 1-3*, 28, octobre 1999, p. 177–189.
- [4] B. GIRAU, A. TISSERAND, « MLP computing and learning on FPGA using on-line arithmetic », *Int. Journal on System Research and Information Science*, 1999.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [5] F. ALBU, D. MARTINEZ, « The Application of Support Vector Machines with Gaussian Kernels for Overcoming Co-channel Interference », *in: IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing IX*, août 1999.
- [6] F. ALEXANDRE, « Neurosymbolic Integration for Industrial Applications », *in: Human Centered Processes - HCP'99, Brest, France*, P. Lenca (éditeur), 10th mini-Euro conference, p. 469–474, septembre 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999/99-R-103/99-R-103.ps>.
- [7] A. BERMAK, D. MARTINEZ, « Digital VLSI implementation of a multi-precision neural network classifier », *in: 6th International Conference on Neural Information Processing ICONIP'99*, novembre 1999.
- [8] A.-R. BERRAH, R. LABOISSIÈRE, « SPECIES: an evolutionary model for the emergence of phonetic structures in an artificial society of speech agents », *in: 5th European Conference on Artificial Life, Lausanne - Suisse*, F. D. et Nicoud Jean-Daniel et Mondada Francesco (éditeur), *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Berlin, septembre 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999/99-R-055/99-R-055.ps>.
- [9] Y. BONIFACE, F. ALEXANDRE, S. VIALLE, « A bridge between two paradigms for parallelism : Neural Networks and general purpose MIMD computers. », *in: International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN'99, Washington, DC*, juillet 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999/99-R-155/99-R-155.ps>.
- [10] Y. BONIFACE, F. ALEXANDRE, S. VIALLE, « A library to implement neural networks on MIMD machines », *in: Euro-Par'99, Toulouse, Lecture Notes in Computer Science*, 1685, CERFACS and ENSEEIHT - IRIT., Springer, p. 935–938, Heidelberg, Germany, septembre 1999.
- [11] L. BOUGRAIN, F. ALEXANDRE, « Recurrent Neural Networks for mobile phone cell planning using topological information », *in: International Conference on Engineering Applications of Neural Networks, Warsaw, Poland*, p. 195–199, septembre 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999/99-R-203/99-R-203.ps>.
- [12] L. BOUGRAIN, F. ALEXANDRE, « Unsupervised Connectionist Clustering Algorithms for a better Supervised Prediction : Application to a radio communication problem », *in: International Joint Conference on Neural Networks, Washington (D.C.), USA*, International Neural Networks Society, juillet 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999//.ps>.

-
- [13] L. BOUGRAIN, « Détection et traitement de "données à problèmes" », *in: 7ième journées de la Société Francophone de Classification, Nancy, France*, p. 333–339, septembre 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999/99-R-202/99-R-202.ps>.
 - [14] A. ELISSEEFF, H. PAUGAM-MOISY, Y. GUERMEUR, « Risque garanti pour les modèles de discrimination multi-classes », *in: SFC*, p. 111–118, septembre 1999.
 - [15] H. FREZZA-BUET, F. ALEXANDRE, « Modeling prefrontal functions for robot navigation », *in: International Joint Conference on Artificial Neural Networks*, 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999//.ps>.
 - [16] H. FREZZA-BUET, F. ALEXANDRE, « Specialization within cortical models: An application to causality learning », *in: 7th European Symposium on Artificial Neural Networks*, 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999//.ps>.
 - [17] B. GIRAU, P. MARCHAL, P. NUSSBAUM, A. TISSERAND, H. F. RESTREPO, « Evolvable platform for array processing: a one-chip approach », *in: MicroNeuro*, avril 1999.
 - [18] J.-C. LAMIREL, « Le modèle neuronal multi-topographique MicroNOMAD : application à l'analyse et à la consultation d'une base iconographique », *in: Colloque de bibliométrie appliquée de l'Île Rousse, Ile Rousse, Corse*, SFBA, septembre 1999.
 - [19] R. REYNA, D. ESTEVE, D. MARTINEZ, « An integrated vision system: object detection and localization », *in: 3rd International Workshop on design of mixed mode integrated circuits and applications*, juillet 1999.
 - [20] N. ROUGIER, F. ALEXANDRE, *in: , Washington, D. C.*, juillet 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999/99-R-088/99-R-088.ps>.
 - [21] N. ROUGIER, H. FREZZA-BUET, F. ALEXANDRE, *in: , Stockholm*, août 1999, <http://www.loria.fr/publications/1999/99-R-087/99-R-087.ps>.

Rapports de recherche et publications internes

- [22] B. GIRAU, « FPNA, FPNN: from programmable fields to topologically simplified neural networks », *Rapport de recherche*, 1999.
- [23] B. GIRAU, « Synchronous FPNNs: neural models that fit reconfigurable hardware », *Rapport de recherche*, octobre 1999.