



HAL
open science

Mise au point du système vibrissal du robot-rat Psikharpax et contribution à la fusion de ses capacités visuelle, auditive et tactile

Steve N'Guyen

► **To cite this version:**

Steve N'Guyen. Mise au point du système vibrissal du robot-rat Psikharpax et contribution à la fusion de ses capacités visuelle, auditive et tactile. Neurosciences [q-bio.NC]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2010. Français. NNT: . tel-00579980

HAL Id: tel-00579980

<https://theses.hal.science/tel-00579980>

Submitted on 25 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE - PARIS 6

ÉCOLE DOCTORALE EDITE

T H È S E

pour obtenir le titre de

Docteur en Sciences

de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6

Mention : INFORMATIQUE

Présentée et soutenue par

Steve N'GUYEN

**MISE AU POINT DU SYSTÈME
VIBRISSAL DU ROBOT-RAT
PSIKHARPAX ET CONTRIBUTION À
LA FUSION DE SES CAPACITÉS
VISUELLE, AUDITIVE ET TACTILE**

Thèse dirigée par Jean-Arcady MEYER

préparée à l'ISIR (UPMC)

soutenue le 23 septembre 2010

Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Frédéric ALEXANDRE	-	INRIA (LORIA)
	Yves BURNOD	-	INSERM (ISC)
<i>Directeur :</i>	Jean-Arcady MEYER	-	UPMC (ISIR)
<i>Examineurs :</i>	Bruno GAS	-	UPMC (ISIR)
	Fathi BEN OUEZDOU	-	UVSQ (LISV)
<i>Invité :</i>	Patrick PIRIM	-	BVS

Résumé

La perception de l'environnement à travers différentes modalités sensorielles est une capacité essentielle à la survie des animaux. La compréhension du fonctionnement de ces différentes modalités ainsi que du mécanisme de leur intégration en une représentation unique est un enjeu majeur en neurosciences ainsi qu'en matière de conception d'architectures de contrôle de robots autonomes.

Le rat, par exemple, exploite énormément les informations tactiles fournies par ses vibrisses. Elles lui servent notamment à reconnaître des textures ou des formes, comme à évaluer la taille d'une ouverture... Cette modalité, très étudiée en biologie, n'a été que peu abordée dans le domaine de la robotique. L'audition et la vision fournissent également de riches informations sur l'environnement et ces trois modalités fonctionnent de manière complémentaire.

Une des structures intégrant toutes ces modalités est le colliculus supérieur, région sous-corticale commune à la plupart des vertébrés. Cette structure fonctionnant comme un système attentionnel, permet de détecter les stimuli pertinents et de s'orienter vers ceux-ci tout en ignorant les stimuli inutiles.

L'objectif de ce travail est de développer les différentes capacités sensorielles (tactile, auditive et visuelle) du robot-rat Psikharpax et de les intégrer en une représentation multi-sensorielle en s'inspirant de ces connaissances biologiques.

Nous avons tout d'abord développé un système vibrissal artificiel permettant de reconnaître des textures sur un robot mobile. Nous avons montré que deux hypothèses biologiques s'affrontant pour expliquer le codage des informations tactiles sont peut-être compatibles.

Nous avons ensuite collaboré au développement d'un système auditif binaural permettant la localisation et la séparation de sources. Nous avons montré que les mécanismes permettant la reconnaissance de textures avec le système vibrissal, permettait de reconnaître des sons avec le système auditif.

Puis nous avons développé un système d'attention visuelle en adaptant et en intégrant des modèles neuro-mimétiques de colliculus supérieur et de ganglions de la base avec un mécanisme d'apprentissage par renforcement. Ce modèle inclut des boucles sous-corticales et corticales permettant l'apprentissage des caractéristiques spatiales et non-spatiales des stimuli. Nous avons montré que ce système permettait de générer des saccades oculaires vers des cibles génératrices de récompense.

Enfin, nous avons étendu ce modèle d'attention visuelle aux modalités tactile et auditive et montré ses capacités à reproduire les phénomènes d'intégration multi-sensorielle. Nous avons également utilisé ce modèle sur un robot mobile pour générer des comportements d'orientation vers des stimuli multi-sensoriels associés à des récompenses.

Nous concluons que ce modèle permet la gestion de stimuli multi-sensoriels de manière assez robuste pour être utilisé sur un robot mobile. Il génère de plus quelques prédictions testables.

Abstract

To perceive the environment through multiple sensory modalities is an ability mandatory for an animal's survival. Understanding how these modalities operate and the way they are integrated in a unique representation is a major issue for neurosciences, as well as for the design of autonomous robots.

The rat, for example, heavily relies on its whiskers to recognize textures or shapes and even to evaluate the size of an aperture. This sensory modality, although widely studied in biology, has generated few research efforts in robotics. Audition and vision also provide a lot of information about the environment and these three sensory modalities turn out to be highly complementary.

One structure known to integrate them is the superior colliculus, a sub-cortical area common to almost all vertebrates. This structure acting as an attentional system, allows to detect and generate orienting behavior toward relevant stimuli while ignoring others.

The aim of this work is to implement these sensory modalities (tactile, auditive and visual) on the robot-rat *Psikharpax* and to take the relevant biological knowledge into account in order to integrate them in a multi-sensory percept.

We first developed an artificial whisker system allowing texture recognition on a robotic platform. We demonstrated that two apparently opposite biological theories about the encoding of tactile information may be, in fact, complementary.

We then collaborated to the development of a binaural auditive system making source localization and separation possible. We demonstrated that the mechanism we used for texture recognition with whiskers can also be used for sound recognition.

We also developed a visual attentional system integrating neuromimetic models of superior colliculus and basal ganglia with the ability of reinforcement learning. This model includes sub-cortical and cortical loops allowing for the learning of spatial and non-spatial features. We demonstrated that this system was able to generate saccades toward rewarding targets.

Finally, we extended this attentional model to tactile and auditive modalities and demonstrated its ability to produce multi-sensory integration. We also used this model on a mobile robotic platform in order to control the orientation behavior toward multi-sensory targets associated with a reward.

We conclude that this model makes it possible to manage multi-sensory stimuli in a way robust enough to be used on a mobile robot. It also generates several testable predictions.

Remerciements

Tout d'abord merci infiniment aux membres du jury qui ont accepté d'être présent lors de ma soutenance. Merci à Bruno Gas et Fethi Ben Ouezdou et merci particulièrement à Frédéric Alexandre et Yves Burnod qui ont consenti à rapporter cette thèse dans des contraintes de temps impensables.

Je remercie bien sûr Jean-Arcady Meyer dont je suis fier d'avoir été le thésard, pour sa bienveillance rassurante qui m'aura permis d'effectuer ce travail en toute quiétude. Son aversion aiguë pour mes longues phrases sans verbe ayant sans doute grandement améliorée mon style littéraire.

Un grand merci également à Patrick Pirim sans qui cette thèse n'aurait pas pu avoir lieu et dont le constant enthousiasme et l'inépuisable réserve d'idées aura su effacer mes doutes. Son dynamisme reste pour moi un modèle.

Merci à Agnès Guillot pour ses nombreux conseils dans tous les domaines et son œil critique infaillible ne laissant passer aucun détail. Merci à Benoît Girard qui m'aura initié aux joies tecto-basales, même si j'ai dû quand même utiliser mon cortex pour réaliser cette thèse. Merci à Christophe Grand pour sa patience et ses week-ends de travail sur le robot, le samedi est un jour tellement plus calme pour travailler au labo.

Merci à tous mes collègues de l'AnimatLab puis de l'ISIR de m'avoir supporté durant cette thèse ainsi que pour toutes nos discussions, scientifiques ou non. Même considéré parfois comme un « ingénieur », j'ai vraiment apprécié travailler avec vous.

Merci à tous mes collègues de BEV puis de BVS de m'avoir supporté durant cette thèse ainsi que pour toutes nos discussions, scientifiques ou non. Même considéré parfois comme un « chercheur », j'ai vraiment apprécié travailler avec vous. Cette « double vie » laboratoire/entreprise fut réellement très enrichissante.

Merci également à tous mes amis qui ont vu passer ces années en se demandant ce que je faisais. Décompresser avec vous fut vital même si, sans doute trop rare.

Merci à « la Pinte au Bossu » et à tous ceux qui y ont participé, puisse la bière couler à flot pendant longtemps encore.

Merci enfin à ma famille, qui m'aura soutenu jusqu'au bout et qui m'aura sans relâche imploré à moins travailler et à prendre des vacances.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Approche « animat »	2
1.2	Projet Psikharpax	5
1.3	Objectif de notre travail	6
1.4	Plan	7
2	Système tactile	9
2.1	Introduction	9
2.2	Biologie	10
2.2.1	Transduction	10
2.2.2	Circuit cérébral	13
2.3	Système vibrissal artificiel	14
2.3.1	État de l'art	14
2.3.2	Transduction	16
2.3.3	Validation du système	18
2.3.4	Extraction de caractéristiques	20
2.4	Expériences	26
2.4.1	Tête fixe	26
2.4.2	Robot mobile	29
2.4.3	Reconnaissance de formes	33
2.5	Discussion	35
3	Système auditif	39
3.1	Introduction	39
3.2	Biologie	40
3.2.1	Transduction	40
3.2.2	Chemin neuronal	43
3.3	Système auditif artificiel	45
3.3.1	Transduction	45
3.3.2	Modèle	46
3.4	Expériences	51
3.4.1	Localisation	51
3.4.2	Séparation de sources	53
3.4.3	Reconnaissance	53
3.5	Discussion	54
4	Système visuel	57
4.1	Introduction	57
4.2	Biologie	58
4.2.1	Circuits de la vision	58

4.2.2	Colliculus supérieur	62
4.2.3	Ganglions de la base	63
4.2.4	Circuit saccadique	65
4.3	Système visuel artificiel	67
4.4	Génération de saccades	73
4.4.1	Description du modèle	73
4.5	Expériences	80
4.5.1	Dispositif expérimental	80
4.6	Résultats	81
4.6.1	Comportements basiques	81
4.6.2	Comportements complexes	82
4.7	Discussion	84
5	Intégration multi-sensorielle	91
5.1	Introduction	91
5.2	Biologie	94
5.2.1	Structures corticales	94
5.2.2	Structures sous-corticales	97
5.3	État de l'art	98
5.4	Généralisation du modèle de génération de saccades	102
5.4.1	Modèle multi-sensoriel	102
5.4.2	Orientation	107
5.5	Expériences	108
5.5.1	Amélioration multi-sensorielle	108
5.5.2	Comportement	113
5.6	Discussion	118
6	Discussion générale	125
6.1	Contributions	125
6.2	Limitations et perspectives	127
6.2.1	Améliorations des modalités développées	127
6.2.2	Traitements sensoriels primaires	127
6.2.3	Importantes améliorations futures	129
6.2.4	Odorat	130
6.2.5	Émotions	131
6.2.6	Capacités cognitives	132
7	Conclusions	135
A	Paramètres	139
A.1	Paramètres du modèle de SC	139
A.2	Paramètres du modèle de BG	139
A.3	Paramètres du modèle de SC multi-sensoriel	140
	Bibliographie	141

Introduction

Sommaire

1.1	Approche « animat »	2
1.2	Projet Psikharpax	5
1.3	Objectif de notre travail	6
1.4	Plan	7

*Nihil est in intellectu quod non prius fuerit in sensu*¹. Cette maxime d'Aristote – au coeur du courant de pensée « empiriste » – place l'expérience sensible comme source de toute connaissance (*tabula rasa*). Même si le débat philosophique et psychologique qui s'ensuivra – opposé à « l'innéisme » de Platon, pour qui il existe des idées ou des facultés mentales innées – durera des siècles, la perception reste la base de l'intelligence. Il ne fait aujourd'hui plus aucun doute que le corps et l'esprit sont intimement liés et que nous dépendons énormément des expériences sensibles que nous vivons.

Pour autant, il reste beaucoup à comprendre sur la manière dont nous percevons le monde et la perception multimodale, en particulier, pose encore de nombreuses questions. Il semble, en effet, que l'évolution ait favorisé l'apparition et le développement d'organismes capables de percevoir leur environnement à travers de multiples canaux et, donc, que la perception multimodale favorise la survie des organismes.

La plupart des recherches dans le domaine de la perception se sont concentrées sur les propriétés d'une seule modalité à la fois. Il a alors été possible d'accumuler une importante quantité de données concernant chaque sens, du niveau cellulaire au niveau comportemental. Cependant, cette approche a laissé de côté l'aspect fondamentalement multi-sensoriel de la perception. En dehors de l'environnement très contrôlé de certaines expériences de laboratoire, le cerveau reçoit en permanence un flux d'informations provenant de toutes ses entrées sensorielles. Sa tâche consiste alors à trier et à coupler ces informations, quelles que soient leurs modalités, afin d'augmenter la probabilité que les événements soient détectés, identifiés et qu'ils produisent la réaction adéquate.

Il existe quelques données comportementales et neurophysiologiques permettant d'envisager des modélisations computationnelles de la fusion multi-sensorielle. Certains travaux ont déjà été effectués dans ce domaine. L'approche « animat », de par son aspect intégratif et sa démarche « transversale » à l'interface entre la robotique et

1. « Il n'y a rien dans l'intelligence qui ne passe d'abord par les sens »

les neurosciences, se trouve être particulièrement concernée par ce problème. Ainsi le travail que nous développons dans cette thèse a vocation à contribuer à cette approche.

Dans cette section, nous rappellerons la situation de l'approche animat dans le domaine général de l'intelligence artificielle. Nous y situerons également le projet Psikharpax et nous préciserons en quoi les objectifs de cette thèse visent à contribuer à ce projet.

1.1 Approche « animat »

Depuis 1956 et la conférence du Dartmouth College qui lança cette discipline, l'Intelligence Artificielle (IA) cherche à reproduire l'intelligence humaine par le biais de l'informatique. Au départ, cette quête de l'IA était basée sur la thèse que l'intelligence pouvait se réduire à la manipulation de symboles [Newell, 1980] (IA symbolique). Cette approche donna quelques bons résultats pour des tâches de haut niveau, comme jouer aux échecs ou produire des expertises, mais il apparût rapidement qu'elle présentait de graves limitations malgré les importantes avancées techniques qu'elle avait engendrées.

Ainsi dans les années 80, en réaction aux échecs de l'IA symbolique, une « nouvelle IA » émergea grâce à l'impulsion de roboticiens comme Rodney Brooks lequel, reprenant les critiques de l'IA symbolique de Hubert Dreyfus [Dreyfus, 1978], insista sur le fait que l'intelligence humaine dépend davantage de ses capacités « inconscientes » que de la manipulation « consciente » de symboles. Cette nouvelle approche *bottom-up* (en opposition à l'approche *top-down* de l'IA symbolique) proposait une IA « située » (c'est-à-dire interagissant dans un environnement) et incarnée (*embodied*) (c'est-à-dire exploitant un corps physique) dont le but n'était plus d'atteindre le niveau de l'intelligence humaine, mais plutôt celui de reproduire les simples capacités adaptatives des insectes. Alan Turing avait déjà brièvement envisagé cette opposition entre l'approche classique et une approche située en conclusion de son article de 1950 [Turing, 1950], même si ses ambitions restaient démesurées :

*We may hope that machines will eventually compete with men in all purely intellectual fields. But which are the best ones to start with? Even this is a difficult decision. Many people think that a very abstract activity, like the playing of chess, would be best. It can also be maintained that it is best to provide the machine with the best sense organs that money can buy, and then teach it to understand and speak English. This process could follow the normal teaching of a child. Things would be pointed out and named, etc. Again I do not know what the right answer is, but I think both approaches should be tried.*²

2. « On peut espérer que les machines rivaliseront avec les hommes dans tous les domaines purement intellectuels. Mais avec lesquels commencer ? Même ceci constitue une décision difficile. Beaucoup de gens pensent qu'une activité très abstraite, comme jouer aux échecs, serait le mieux. Il peut également être soutenu qu'il serait mieux d'équiper la machine avec les meilleurs organes

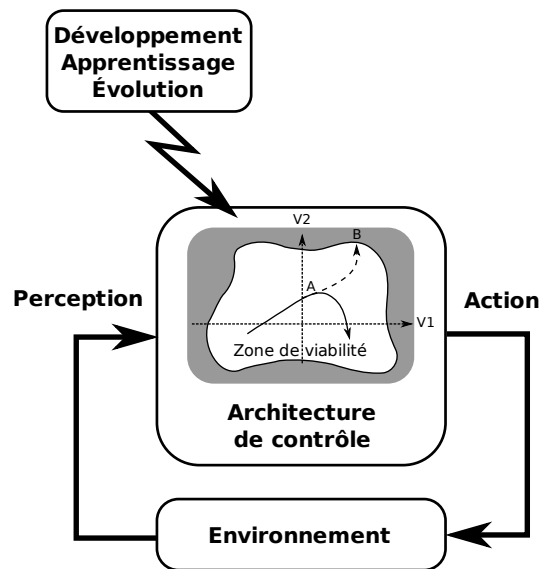


FIGURE 1.1 – Un animat est « situé » dans un environnement réel ou simulé. Il a des senseurs qui captent des informations de l’environnement externe et/ou interne, des effecteurs qui lui permettent d’agir dans l’environnement, et une structure de contrôle qui coordonne ses perceptions et ses actions. Le comportement d’un animat peut être qualifié d’adaptatif tant que sa structure de contrôle permet de maintenir ses variables essentielles (par exemple, V1 et V2) dans leur zone de viabilité. Ici, une action correctrice a été accomplie au point A, de façon à éviter de quitter la zone de viabilité au point B. Dans la mesure où cette structure de contrôle sert aussi à choisir les buts successifs que l’animat cherche à atteindre ou à arbitrer entre des buts conflictuels, elle joue le rôle d’un système motivationnel. L’organisation de la structure de contrôle peut être modifiée par des processus de développement, d’apprentissage ou d’évolution. D’après [Meyer and Guillot, 1991]

Cette approche ravivait les idées des cybernéticiens des années 50 comme W. Grey Walter (1950) qui, avec ses tortues, conçut certains des premiers robots autonomes électro-mécaniques.

En effet, l’IA symbolique (qu’on appellera dès lors la GOFAI, *Good old-fashioned IA* par dérision) ne s’intéressait pas aux problèmes de la perception et de l’interaction physique avec l’environnement, alors que les fondateurs de la nouvelle IA, déclaraient : *it is comparatively easy to make computers exhibit adult level performance on intelligence tests or playing chess, and difficult or impossible to give them the skills of a one-year-old when it comes to perception and mobility*³ (paradoxe

sensoriels que l’argent peut acheter, et de lui apprendre à parler anglais. Ce processus pourrait suivre l’apprentissage normal d’un enfant. Les objets seraient montrés et nommés, etc. Encore une fois je ne sais pas quelle est la bonne réponse, mais je pense que les deux approches devraient être testées. »

3. « Il est comparativement simple de faire exhiber par un ordinateur des performances d’adulte

de Moravec [Moravec, 1990]). Une explication de ce paradoxe est que les capacités sensori-motrices inconscientes du cerveau, indispensables à la survie, sont issues de milliards d'années d'évolution, alors que les capacités de raisonnement conscientes de haut niveau ne sont apparues que très récemment (d'un point de vue de l'évolution)[Brooks, 1990]. Ce point de vue rejoint celui de William James (1884), pour qui *le cerveau n'est pas construit pour penser de façon abstraite mais pour assurer notre survie dans le monde.*

C'est à la suite de ces constatations sur l'IA que naquit « l'approche animat » (compression du terme « animaux artificiels »). L'objectif de cette approche était la compréhension des mécanismes d'autonomie et d'adaptation des animaux afin de produire des robots exhibant des capacités semblables. [Guillot and Meyer, 2001, Wilson, 1990, Meyer, 1995, Meyer, 1996a, Meyer, 1996b].

Cette approche multi-disciplinaire, combinant à la fois robotique, biologie, éthologie et sciences cognitives, part de la constatation que les êtres vivants les plus simples sont capables de comportements autonomes et adaptatifs bien supérieurs aux systèmes artificiels actuels. La notion d'autonomie ici évoquée est celle d'Ashby (1952), une généralisation de celle d'homéostasie, selon laquelle l'organisme agit en cherchant à maintenir un certain nombre de variables essentielles à l'intérieur d'une zone de viabilité (cf. fig. 1.1). Cette notion implique, dans un environnement inconnu et imprévisible, des comportements souvent complexes et parfois inattendus (appelés également « émergents »). Ainsi dans le cadre de la « nouvelle IA », l'approche animat est :

- *bio-inspirée*, c'est-à-dire qu'elle vise à incorporer dans les créatures correspondantes des mécanismes, des processus ou des structures, mis en évidence chez l'animal par la biologie ;
- *bottom-up*, elle cherche d'abord à reproduire les comportements les plus simples pour les réutiliser ensuite comme constituants de base des comportements plus complexes ;
- *située*, les systèmes produits selon cette approche ont vocation à être embarqués sur des plateformes robotiques évoluant dans le monde réel.

La perspective de cette approche est donc double puisqu'il s'agit, d'un point de vue fondamental, de chercher à comprendre les mécanismes adaptatifs du vivant et, d'un point de vue appliqué, d'incorporer ces mécanismes dans des systèmes artificiels [Meyer and Guillot, 1994, Guillot and Meyer, 2000, Guillot and Meyer, 2001, Webb, 2001].

sur des tests d'intelligence ou au jeu d'échec, mais il est difficile, voire impossible, de lui donner les capacités d'un enfant d'un an en terme de perception et de mobilité »

1.2 Projet Psikharpax

Cette thèse s'effectue dans le cadre du projet Psikharpax⁴. Ce projet vise à synthétiser un « rat artificiel » en implémentant des mécanismes adaptatifs mis en évidence sur le rat réel. En conformité avec les objectifs de l'approche animat, il est destiné, d'un côté, à tester la cohérence et la validité des connaissances sur le fonctionnement du système nerveux du rat et, d'un autre côté, à mettre au point un robot adaptatif capable d'autonomie dans le choix de ses buts et de ses actions [Meyer, 2002, Guillot and Meyer, 2002, Meyer et al., 2005].

Le choix du rat n'est pas fortuit car ce mammifère et son comportement sont très étudiés par les biologistes. En particulier, c'est sans doute l'animal pour lequel le produit (complexité du cerveau)×(connaissances biologiques) est le plus élevé [Meyer et al., 2005]. Aussi, cette relative bonne connaissance du comportement du rat et de la neuro-physiologie correspondante constitue-t-elle une source d'informations primordiale pour les modélisateurs et les roboticiens.

Le projet Psikharpax comporte un aspect intégratif évident dans la mesure où la production d'un rat artificiel nécessite la conception de senseurs, actionneurs et architectures de contrôle devant fonctionner de concert. Afin de réaliser cet objectif, la perception – et plus particulièrement la perception multimodale – est une capacité essentielle. En effet, la survie des animaux repose énormément sur leur capacité à percevoir les proies, les prédateurs et l'environnement en général, dans les conditions les plus variées. Les comportements tels que trouver de la nourriture, naviguer dans l'environnement ou éviter les dangers nécessitent tous un système perceptif adapté.

Les vibrisses (moustaches) du rat par exemple, lui permettent de se déplacer dans l'obscurité, reconnaissant textures et objets en les palpant.

L'audition, elle, permet notamment au rat de détecter les dangers lointains. Par exemple, il est clair que la reconnaissance et la localisation du son spécifique produit par un prédateur en chasse est une capacité particulièrement utile à sa survie.

La vision est, bien entendu, un sens primordial dont la richesse et la précision en plein jour restent indispensables à la reconnaissance d'objet et à la localisation.

Il est donc nécessaire que Psikharpax soit équipé de multiples senseurs complémentaires, ainsi que de la capacité à intégrer ses différentes modalités. Toutefois la perception seule ne suffit évidemment pas pour survivre, certains comportements réflexes, ainsi qu'un certain niveau de cognition, sont également nécessaires.

L'intégration multimodale constitue un domaine de recherche classique en robotique généralement appelé « fusion de capteurs ». Ce domaine exploite des techniques diverses comme les filtres de Kalman, la logique floue, le raisonnement Dempster-Shafer, etc (pour une rapide revue voir [Kam et al., 1997]). Ces techniques sont souvent très formelles parce que leurs concepteurs cherchent généralement à en garantir l'optimalité.

La nature apporte également des réponses à ce problème. Il va sans dire que

4. Psikharpax (littéralement « le voleur de miettes ») est le « roi des rats » dans la *Batrachomyomachie* (littéralement la « Bataille des grenouilles et des rats »), poème grec parodiant l'*Iliade* et faussement attribué à Homère.

les animaux sont capables d'intégrer les informations provenant de leurs différents organes sensoriels de manière très efficace. Comprendre la façon dont le cerveau effectue cette fonction est une question fondamentale des neurosciences et pourrait également fournir des méthodes intéressantes (et, sans doute, plus adaptatives) pour la robotique.

1.3 Objectif de notre travail

Notre travail porte donc sur la conception et la mise au point des différentes modalités sensorielles du robot-rat Psikharpax. Nous nous intéressons en particulier au sens tactile à travers les vibrisses (moustaches) dont le rat dépend énormément. Il existe très peu de travaux sur l'utilisation du sens tactile en robotique et encore moins de travaux utilisant des vibrisses. En revanche, il existe aujourd'hui beaucoup de données biologiques sur ce sujet, ce qui va nous permettre de concevoir un système vibrissal artificiel bio-inspiré.

L'audition est également une modalité importante relativement peu exploitée en robotique. Cette thèse contribue donc également à la conception d'un système auditif.

La vision est sans doute le sens le plus étudié, et en tout cas le plus utilisé, en robotique. Nous développerons donc dans cette thèse un système visuel artificiel en nous servant des technologies développées par l'entreprise BVS⁵, laquelle a contribué au financement de cette thèse dans le cadre d'une convention CIFRE en partenariat avec l'UPMC. Nous nous intéresserons en particulier à l'attention visuelle par le biais du système saccadique.

La région du cerveau responsable des saccades oculaires – le colliculus supérieur – est également une région importante d'intégration multi-sensorielle. Aussi notre travail vise également à intégrer les modalités tactiles, auditives et visuelles dans ce système. Le modèle obtenu permettra alors de générer des comportements d'orientation vers des stimuli multimodaux.

Les contraintes de temps de cette thèse ne nous ont malheureusement pas permis de développer ces différentes modalités sensorielles de manière complète. C'est pourquoi chaque sens n'a été testé que sur certains comportements particuliers que nous avons jugés importants pour Psikharpax.

On notera à ce propos, en passant, que notre travail est principalement centré sur le rat, mais que, parfois, nous chercherons à combler les lacunes du savoir correspondant en empruntant des connaissances sur la biologie d'autres animaux, comme le chat et le singe.

Enfin, dans le cadre de l'approche animat, ce travail se place au niveau de la démarche bio-inspirée en interaction avec les neurosciences. L'objectif premier de cette thèse est donc de contribuer aux connaissances biologiques et éventuellement d'en tirer des enseignements utiles à la robotique.

5. Brain Vision Systems : www.bvs-tech.com

1.4 Plan

Dans le premier chapitre, nous décrirons le système vibrissal du rat et son implémentation artificielle. Nous testerons ses capacités dans des tâches de reconnaissance de formes et de textures sur robot mobile. Les possibles implications biologiques de cette implémentation seront ensuite discutées.

Dans le second chapitre, nous décrirons le système auditif et nous développerons sa modélisation. Les capacités de ce système dans des tâches de localisation, séparation et reconnaissance de sources seront ensuite démontrées. Un parallèle entre ce système et le système vibrissal sera discuté.

Dans le troisième chapitre, le système visuel sera décrit. Nous proposerons un modèle de colliculus supérieur en interaction avec des ganglions de la base et capable de générer des saccade en direction d'objets récompensés.

Dans le quatrième chapitre, les systèmes tactile, auditif et visuel seront fusionnés dans un modèle de colliculus supérieur multi-sensoriel. Ce modèle sera testé en simulation et dans des tâches comportementales sur la plateforme robotique.

Enfin, la conclusion résumera les avancées effectuées et ouvrira des perspectives vers de nouveaux travaux.

Systeme tactile

Sommaire

2.1	Introduction	9
2.2	Biologie	10
2.2.1	Transduction	10
2.2.2	Circuit cerebral	13
2.3	Systeme vibrissal artificiel	14
2.3.1	Etat de l'art	14
2.3.2	Transduction	16
2.3.3	Validation du systeme	18
2.3.4	Extraction de caracteristiques	20
2.4	Experiences	26
2.4.1	Tete fixe	26
2.4.2	Robot mobile	29
2.4.3	Reconnaissance de formes	33
2.5	Discussion	35

2.1 Introduction

Le toucher constitue une modalite sensorielle tres importante pour un grand nombre d'espèces, des insectes aux mammiferes. Le toucher par l'intermediaire des « moustaches » – ou vibrisses – est assez repandu : on le retrouve chez un grand nombre de rongeurs (souris, rats, chinchillas...), de carnivores (chiens, chats, morses...) et meme de primates (singes rhesus, singes ecreuil...).

Le systeme vibrissal du rat est tres representatif des capacites offertes par cette modalite sensorielle. Les moustaches du rat sont des poils tres differencies situes de chaque cote du museau selon une organisation precise. Durant son activite nocturne, le rat se deplace souvent dans des environnements obscurs ou sans lumiere, dans d'etroits passages ou le long des murs. En explorant l'environnement le rat agite ses vibrisses d'avant en arriere (mouvement rostro-caudal) – cette capacite de *whisking* n'existe pas chez tous les animaux notes de vibrisses – afin d'obtenir des informations tactiles sur les obstacles et objets qu'il rencontre [Vincent, 1912].

Les vibrisses du rat sont souvent comparees aux extremités des doigts des humains en terme de capacites tactiles [Morley et al., 1983]. En effet, les rats sont capables de finement reconnaitre des textures [Carvell and Simons, 1990, Guic-Robles

et al., 1989], des objets [Brecht et al., 1997], ou même de déterminer précisément la taille d'une ouverture [Krupa et al., 2001].

L'importance comportementale des vibrisses pour le rat est reflétée par une sur-représentation corticale de cette modalité [Woolsey, 1967]. En effet, il apparaît que les vibrisses se projettent somatotopiquement au niveau du cortex, c'est-à-dire qu'à chaque vibrisse correspond une zone précise de ce cortex, formant ainsi une carte représentant la matrice vibrissale ou mystaciale. De plus, chaque zone correspondant à une vibrisse forme une unité discrète – architectonique – clairement délimitée appelée « tonneau ». L'ensemble de la zone du cortex somatosensoriel correspondante s'appelle ainsi le cortex à tonneaux, ou *barrel cortex*. Cet aspect discret de la représentation des vibrisses est conservé tout au long du cheminement neuronal jusqu'au cortex, ce qui simplifie les manipulations (par rapport aux autres modalités), que ce soit au niveau périphérique (déflexion, coupure de vibrisse...) ou central (électrophysiologie, lésion de tonneau...). Ainsi il est, par exemple, « aisé » d'observer la plasticité au niveau du cortex à tonneaux en amputant à la naissance une rangée de vibrisses par exemple. À la fin du développement, on observe alors une déformation des tonneaux, l'espace occupé par la rangée amputée ayant été partagé entre les autres tonneaux [van der Loos and Woolsey, 1973]. Ce résultat est plus difficile à constater pour le cortex visuel par exemple.

Toutes les qualités citées précédemment ne pouvaient qu'attirer l'attention des roboticiens sur les vibrisses, le sens du toucher étant désormais considéré comme une modalité robuste et puissante [Hartmann, 2001].

Dans le chapitre suivant, nous décrivons un système vibrissal artificiel ainsi qu'un algorithme d'extraction de caractéristiques bio-inspiré. Ce système est testé sur des tâches de reconnaissance de formes et de textures en environnement contraint et sur robot mobile.

2.2 Biologie

2.2.1 Transduction

Les vibrisses sont des poils plus longs et plus épais que les autres, situés sur le museau. L'information tactile captée par le système vibrissal n'est pas captée par la vibrisse elle-même – qui n'est finalement qu'un simple poil constitué de cellules mortes – mais par le follicule pileux à sa base. Ce follicule est particulièrement différencié car possédant une importante innervation et irrigation sanguine. Ainsi il est appelé « complexe follicule-sinus ».

Cette structure montre que la base du poil est ancrée à la papille dermique (derme profond) ainsi qu'au col du complexe. Ces deux points d'attache forment des pivots fixes (la capsule étant relativement rigide [Ebara et al., 2002]) provoquant une déflexion interne au follicule dans le sens opposé à la déflexion externe et, donc, une compression des récepteurs opposés à la direction de déflexion externe (cf. fig. 2.2). Une modélisation simplifiée de ce fonctionnement est décrite dans [Mitchinson et al., 2004].

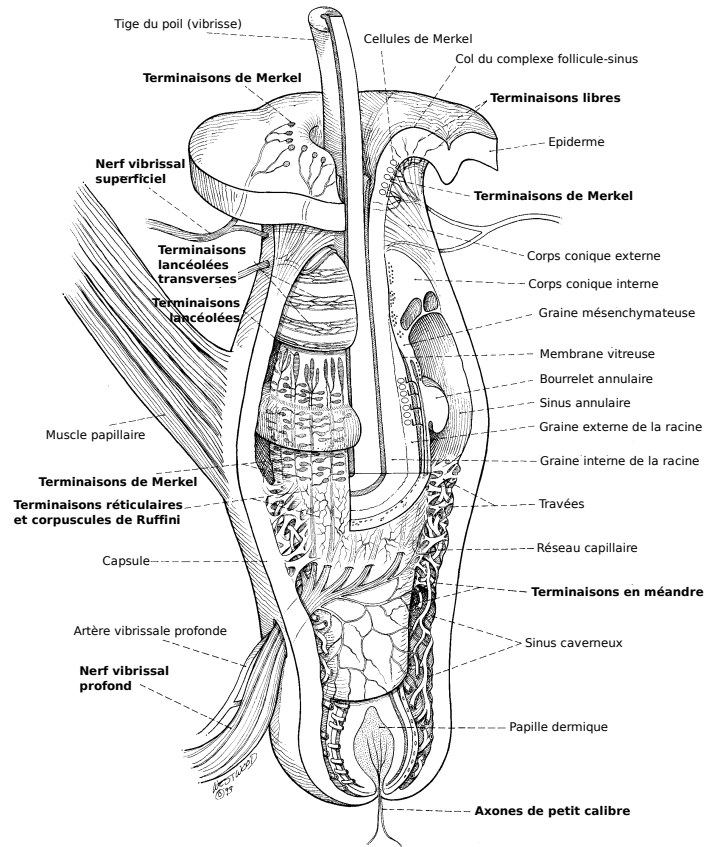


FIGURE 2.1 – Coupe du complexe follicule-sinus. Adapté de [Rice et al., 1993]

Même si la structure de ce complexe follicule-sinus est relativement bien connue [Vincent, 1912] (cf. fig. 2.1), le rôle précis des nombreux mécanorécepteurs observés reste encore incertain. En effet on trouve plusieurs type de terminaisons : les terminaisons de Merkel connues pour être sensibles à la pression, les terminaisons lancéolées probablement sensibles à l'étirement, et les terminaisons réticulaires et de Ruffini (moins nombreuses) également probablement sensibles à l'étirement. On peut noter que les terminaisons libres sont probablement impliquées dans la nociception. En dépit de l'incertitude qui vient d'être évoquée, il existe quand même une classification générale des mécanorécepteurs (également valables pour la peau) divisant ceux-ci en fonction de leur adaptation à une stimulation tactile. On distingue donc les récepteurs à adaptation rapide ou *rapidly adapting* (RA) et les récepteurs à adaptation lente ou *slowly adapting* (SA), avec plusieurs sous-catégories. L'enregistrement au niveau des neurones afférents primaires chez le rat indique une répartition d'environ 3/4 de SA et 1/4 de RA [Shoykhet et al., 2000].

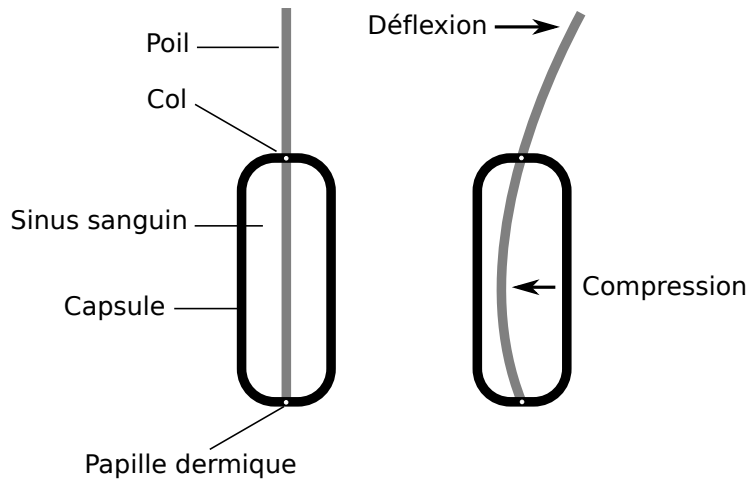


FIGURE 2.2 – Fonctionnement schématique de la déflexion d'une vibrisse selon le modèle décrit dans [Mitchinson et al., 2004].

En plus de cette transduction assez complexe qui opère de manière « passive », le rat est capable d'utiliser ses vibrisses de manière « active », c'est à dire en imposant à ses vibrisses un mouvement oscillatoire d'avant en arrière – respectivement protraction et rétraction – de fréquence entre 5 et 25 Hz [Carvell and Simons, 1990]. Ce mouvement caractéristique de *whisking* serait impliqué dans un certain nombre de comportements. Il est en effet assez clair que les rats adaptent leur mouvement de *whisking* à la tâche demandée. Pendant l'exploration de son environnement, le rat effectue ce mouvement d'oscillation et, lorsque ses vibrisses entrent en contact avec un objet, l'amplitude du mouvement du côté correspondant diminue, alors que celle du côté opposé augmente de manière différentielle. Le rat estime ainsi probablement la distance de l'objet tout en conservant ses capacités d'exploration [Towal and Hartmann, 2006]. De la même manière, ce mouvement serait un facteur important pour la reconnaissance de texture, reconnaissance impliquant notamment la fréquence, la durée de contact, la courbure des vibrisses, ainsi que leur position moyenne [Carvell and Simons, 1995]. De plus les muscles folliculaires responsables de ce mouvement ne contenant pas de terminaisons pour la proprioception, le contrôle de ce mouvement se ferait uniquement grâce aux informations récupérées par les vibrisses [Kleinfeld et al., 1999].

Cependant, il semble que le *whisking* ne soit pas une capacité essentielle à la perception. En effet le rat n'effectue pas forcément ce mouvement, lors des tâches de discrimination de la taille d'une ouverture [Krupa et al., 2001] ou lors de suivi de mur [Milani et al., 1989, Carvell and Simons, 1990, Brecht et al., 1997, Towal and Hartmann, 2006, Ritt et al., 2008] par exemple. De plus, tous les animaux dotés de vibrisses ne peuvent pas produire ce mouvement. Il semble plus probable que le *whisking* soit, en fait, un comportement permettant d'induire une vitesse relative entre un objet et les vibrisses pour en obtenir des informations sur la forme et la

texture, de la même façon que les humains balayent spontanément les textures avec le bout des doigts avec un mouvement oscillatoire similaire [Morley et al., 1983].

La problématique du *whisking* fait également l'objet de nombreux travaux¹ (pour un aperçu voir [Prescott et al., 2009]).

Il se pourrait, enfin, que le sinus sanguin permette au rat de modifier les caractéristiques mécaniques du follicule. En contrôlant l'affluence de sang dans le sinus, il serait capable d'amortir plus ou moins les vibrations de la vibrisse et ainsi de procéder à un niveau supplémentaire de perception active.

2.2.2 Circuit cérébral

Tout au long du circuit neuronal allant de la vibrisse au cortex à tonneaux on retrouve une organisation somatotopique de la matrice mystaciale.

Les corps cellulaires des fibres afférentes innervant les cellules sensorielles du complexe follicule-sinus se trouvent dans le ganglion trigéminal (ganglion V) [Vincent, 1912]. Ces cellules ganglionnaires ont un champ récepteur limité à une seule vibrisse [Lichtenstein et al., 1990]. De plus, la matrice mystaciale est représentée de manière somatotopique dans le ganglion trigéminal [Zucker and Welker, 1969]. On peut noter également que les vibrisses les plus caudales, les plus longues, sont plus représentées dans ce ganglion [Zucker and Welker, 1969]. C'est au niveau de ce ganglion que l'on retrouve les caractéristiques de décharge de type SA et RA citées plus haut. Ces caractéristiques ne sont pas clairement délimitées. Il apparaît en fait qu'il existe au sein de cette classification de larges variations de seuils de sensibilités, de comportement. . . Certaines cellules SA sont sensibles à la direction de déflexion, alors que les RA ne le sont pas. Certaines cellules sont sensibles à la vitesse, alors que d'autres sont plutôt sensibles à l'amplitude de déflexion. Zucker et Welker (1969) concluaient déjà que le motif de décharge des cellules ganglionnaires pouvait également encoder des séquences temporelles complexes représentant les stimulations mécaniques, ce qui semble s'être avéré exact par la suite pour l'encodage des textures [Arabzadeh et al., 2004].

Les informations sensorielles recueillies par les cellules du ganglion trigéminal passent ensuite par les noyaux trigéminaux du tronc cérébral, où chaque vibrisse est associée à une « barrellette », puis à un « barreloïde » du thalamus et enfin à un « tonneau » cortical (cf. fig. 2.3). Il est à noter que ce chemin se divise en plusieurs voies parallèles (pour plus de détails voir [Fox, 2008]).

Cette préservation de la somatotopie de la vibrisse jusqu'au cortex présente un énorme avantage pour l'électrophysiologie. En effet, il est assez simple de provoquer une stimulation contrôlée et reproductible d'une vibrisse, la préservation de la somatotopie durant le chemin neuronal facilitant ensuite l'enregistrement des décharges résultantes. De plus, le « tonneau » du cortex à tonneaux forme un parfait exemple de colonne corticale, visible à l'œil nu. Une colonne corticale est une organisation verticale de neurones traversant les différentes couches du cortex et formant ce que

1. Comme le projet européen BIOTACT www.biotact.org

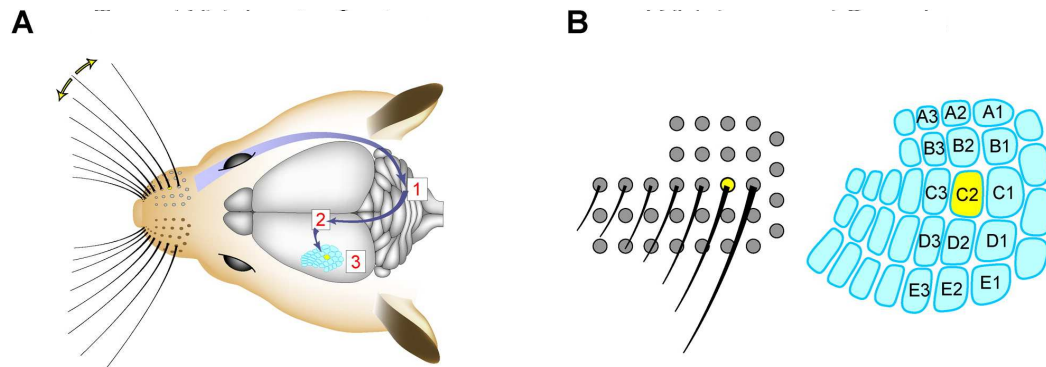


FIGURE 2.3 – A : trajet neuronal d'une vibrisse au tronc cérébral (1) puis au thalamus (2) jusqu'au cortex à tonneaux (3). B : matrice mystaciale et sa représentation dans le cortex à tonneaux. Adapté de [Petersen, 2007]

l'on pense être l'unité de calcul élémentaire du cortex [Szentagothai, 1975, Mountcastle, 1978, Hubel and Wiesel, 1977, Burnod, 1989, Alexandre et al., 1991]. Le cortex est, en fait, composé de ces éléments juxtaposés et interchangeable [Mountcastle, 1997]. La compréhension du calcul, du codage de l'information effectué par ces colonnes est un enjeu majeur pour la compréhension du cerveau. Ainsi, l'étude des vibrisses et du cortex à tonneaux est rapidement devenue importante en biologie.

Il existe également un chemin direct du nerf trijumeau vers le colliculus supérieur (région du tronc cérébral) [Cohen et al., 2008]. Bien que peu étudiée en comparaison du chemin nerf trijumeau-thalamus, cette connexion permet au colliculus supérieur d'être sensible aux stimulations des vibrisses.

2.3 Système vibrissal artificiel

2.3.1 État de l'art

Malgré la puissance et la robustesse de cette modalité relativement peu de robots ont été équipés de vibrisses. Les implémentations de vibrisses artificielles peuvent varier du plus simple interrupteur « binaire » jusqu'aux très précises jauges de contraintes 2D. Brooks (1989), par exemple, a utilisé un capteur constitué d'une tige en métal fixée sur un interrupteur, agissant comme un capteur de sécurité très robuste pour un robot marcheur hexapode. Une autre implémentation de vibrisse artificielle appelée « moustache sonde » – *probe whisker* [Russell, 1985] – constituée d'une tige collée sur un potentiomètre avec un ressort de rappel a été utilisée pour évaluer le contour d'un objet [Russell, 1992]. On peut également noter l'utilisation de vibrisses inspirées du criquet comme capteurs de direction du vent, afin de permettre à un robot de naviguer dans un labyrinthe en suivant le flux d'air produit par un ventilateur à la sortie de celui-ci [Chapman et al., 2000]. Ce capteur était consti-

tué d'un ressort entouré de plusieurs contacts électriques permettant de détecter la direction du vent lorsque celui-ci provoquait une déflexion.

Plus récemment, des systèmes de vibrisses artificielles ont été utilisés en robotique pour la discrimination de textures. De véritables poils de moustaches de rats ont été collés sur des capteurs capacitifs – microphones à électret – et ont servi à produire des capteurs tactiles très précis pour mesurer des signaux dynamiques sur une dimension [Fend et al., 2003, Lungarella et al., 2002]. En utilisant une matrice active de ces capteurs montée sur un robot mobile, Fend et al. (2003) ont réussi à discriminer un jeu de 11 textures en utilisant une mesure de distance des densités spectrales de puissance. Kim et Möller (2004) ont essayé des capteurs piézo-électriques ainsi que des capteurs magnétiques à effet Hall, montés en paires orthogonales, pour mesurer les déflexions des vibrisses en 2D. Tout comme les capteurs capacitifs, les capteurs piézo-électriques suppriment la composante continue du signal, mais elle peut être retrouvée grâce à l'ajout d'un circuit intégrateur. En utilisant un traitement basé sur la densité spectrale de puissance, ces auteurs ont été capables de discriminer un jeu de 7 papiers de verre. Seth et al. (2004) ont également effectué de la reconnaissance de textures en utilisant un ensemble de capteurs « Flex[©] », qui fournissent une mesure unidimensionnelle de courbure. Les différences temporelles entre paires de vibrisses étaient fournies en entrée d'un modèle de « barreloïd » utilisant des neurones à *spike*. Finalement, Fox et al. (2009) ont utilisé deux vibrisses actives avec jauges de contraintes sur deux dimensions sur un robot mobile. Il ont testé différentes méthodes d'extraction de *features* (caractéristiques) bio-inspirée, ainsi que l'influence du contact vibrisses-texture non contraint sur les performances de discrimination.

Aucun des capteurs employés dans ces travaux antérieurs n'est complètement adapté à nos besoins, notre objectif étant de développer une matrice de vibrisses assez intégrée pour pouvoir contenir un minimum de 25 vibrisses reproduisant le mieux possible la morphologie du rat. Pour cela nous avons besoin d'un capteur délivrant une information de déflexion en deux dimensions avec la composante continue. La miniaturisation est également un point important puisque, dans le but d'intégrer le capteur dans un robot rat d'environ 1 m avec une tête de 25 cm, les vibrisses doivent tenir dans un cône de 6 cm de long.

Les capteurs Flex[©] utilisés dans [Seth et al., 2004] fournissent une mesure unidimensionnelle de courbure, ce qui est hors de propos ici puisque les vibrisses elles mêmes ne sont pas sensibles et que seuls les follicules à leurs bases le sont. Les capteurs à électret miniatures utilisés dans [Fend et al., 2003] ont été testés et sont assez petits. Cependant le besoin de coller une tige sur un diaphragme fragile les rend assez peu robustes. De plus, ils ne fournissent pas « naturellement » la composante continue du signal. Les capteurs à effet Hall, ainsi que les jauges de contraintes, sont très précis, cependant ils sont encore relativement gros et nécessitent un important effort d'intégration mécanique afin de permettre de mesurer une déflexion en deux dimension – ce qui est un handicap si l'on veut concevoir une matrice de 25 vibrisses.

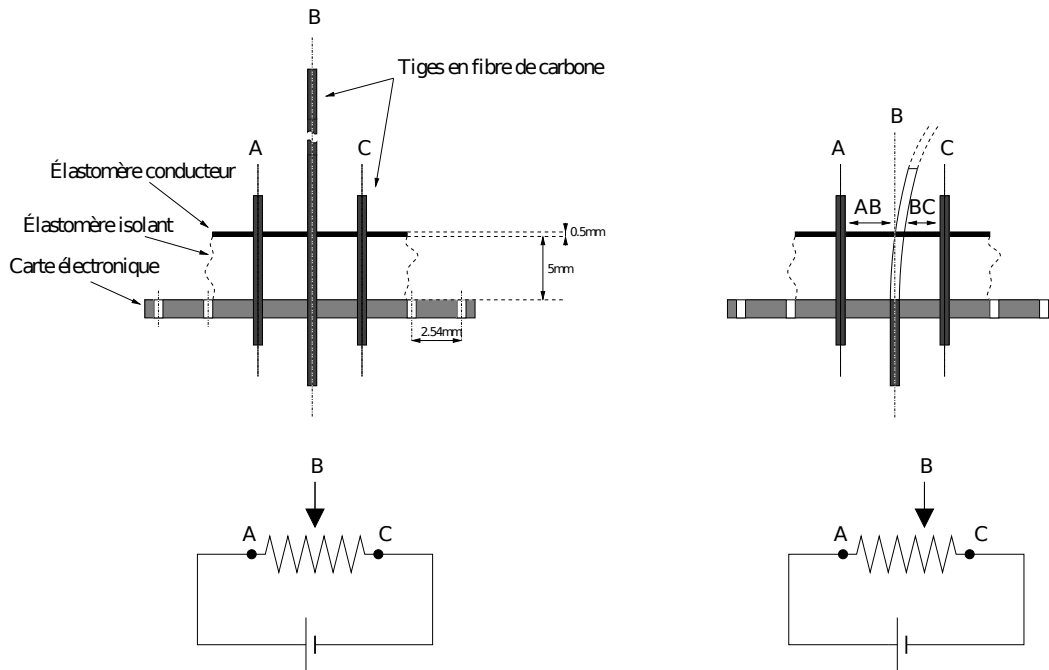


FIGURE 2.4 – Coupe transversale d'un capteur vibrisse avec son circuit équivalent. A gauche : position au repos. A droite : déflexion de la vibrisse. Les points A et C sont les points de référence. B est le point de mesure.

2.3.2 Transduction

Au vu des travaux précédents, la solution adoptée afin de concevoir notre matrice de vibrisses fut de développer un nouveau capteur tactile [N'Guyen et al., 2009]. Parmi les solutions envisagées, l'élastomère conducteur s'avéra le plus commode. En effet un tel élastomère voit sa résistance électrique varier lorsqu'on le déforme. Cette propriété permet ainsi de concevoir une peau artificielle très simplifiée dont on peut mesurer les déformations.

La structure de base de la peau artificielle se compose d'une fine couche (0,5 mm) d'élastomère silicone chargé au carbone (GETELEC BL 10000[©]) formant la partie conductrice sensible. Cette couche sensible est collée sur une couche isolante (Esprit Composite Silicone RTV181[©]) plus épaisse (5 mm) permettant une bonne tenue mécanique. La figure 2.4 montre une coupe de l'élément de base du capteur. L'élastomère conducteur utilisé ici est typiquement employé pour le blindage électromagnétique dans les téléphones mobiles, les joints conducteurs et les connecteurs des dalles LCD. Il possède donc une très faible impédance (résistivité volumique $< 6 \Omega \cdot \text{cm}$), ce qui le rend très peu sensible au bruit et permet une faible amplification. Cependant, la propriété première recherchée est sa capacité à voir sa résistance électrique varier lorsqu'on le déforme. Alors que les indications du fabricant assurent que cet élastomère peut être étiré jusqu'à 150 % de manière réversible, pour notre application

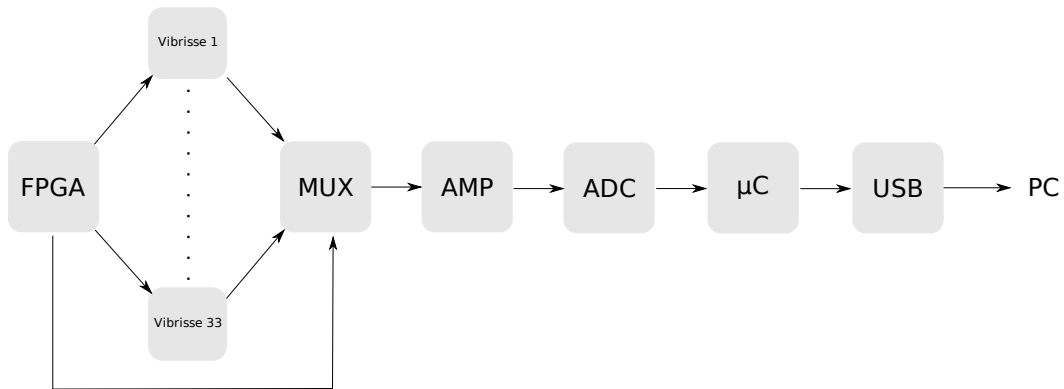


FIGURE 2.5 – Diagramme de la chaîne d'acquisition de la matrice de vibrisses. Un FPGA alimente de manière séquentielle les 2 axes de mesures de chaque vibrisse et contrôle le multiplexage (MUX) du point de mesure. Le point de mesure est ensuite fourni en entrée d'un amplificateur (AMP) et converti en une valeur numérique 8 bits (ADC) transmise au PC par liaison USB via un microcontrôleur (μC).

en tant que capteur tactile, nous n'avons besoin que d'une très faible déformation.

Afin de mesurer la déformation de l'élastomère en un point donné, il est nécessaire de disposer de points de références fixes servant à fournir une tension électrique. En plaçant ensuite un point de mesure entre deux références, le circuit électrique obtenu agit comme un simple potentiomètre. Dans le cas présent nous voulons mesurer la déflexion d'une vibrisse, le point de mesure est donc la base de la vibrisse traversant les deux couches d'élastomère. Pour des raisons de légèreté, nous avons choisi d'utiliser du jonc carbone ($\varnothing 0,5$ mm) composé de fibres de carbone collées par de la résine epoxy. Ces tiges en fibres de carbone étant conductrices, elles forment un point de mesure très commode, le même matériau étant utilisé pour les points de référence. Le capteur unitaire décrit (cf. fig. 2.4) fonctionne donc comme un potentiomètre avec comme valeur au repos $1/2 \times V_{AC}$. Afin de mesurer la déflexion en 2D, il suffit de placer 4 points de référence orthogonalement autour de chaque vibrisse selon les axes antéro-postérieurs et dorso-ventraux et d'effectuer les mesures de manière séquentielle. Chaque vibrisse est ainsi « scannée » selon les deux axes de mesure à une fréquence de 1 157 Hz, puis chaque mesure est amplifiée et convertie en signal numérique avant d'être transmise au PC via une connexion USB (cf. fig. 2.5).

Dans la mesure où l'impact de l'organisation précise des vibrisses du rat sur ses fonctionnalités est encore inconnu, nous avons également tenté de respecter au maximum le gradient de taille (cf. tableau 2.1) ainsi que l'organisation en arc/colonne de la matrice de vibrisses chez le rat (cf. fig. 2.6).

Arc	vibrisses	rat	robot
1	$\alpha, \beta, \gamma, \delta, E1$	41,8	250
2	A1, B1, C1, D1, E2	37,2	200
3	A2, B2, C2, D2, E3	27,6	150
4	A3, B3, C3, D3, E4	20,6	120
5	A4, B4, C4, D4, E5	12,6	100
6	C5, D5, E6	8,33	90
7	C6, D6, E7		70
8	D7, E8		55

TABLE 2.1 – Longueurs moyennes des arcs de vibrisses en mm mesurées sur un spécimen adulte de *rattus norvegicus*. Les vibrisses artificielles du robot sont approximativement 6 fois plus longues.

2.3.3 Validation du système

2.3.3.1 Dispositif Experimental

Afin de démontrer la capacité du système de vibrisses artificiel à discriminer des textures, nous avons utilisé un banc de test constitué d'un cylindre PVC sur lequel différentes textures ont été collées (cf. fig. 2.7). Un moteur DC fait tourner le cylindre et un capteur à effet Hall couplé à un aimant permet de contrôler la vitesse de rotation. Quatre textures différentes – papier de verre grain P100, papier de verre grain P60, grillage métallique de 7 mm et bandes de carton de 2 cm – ont été intentionnellement choisies afin de former 2 groupes différents de 2 textures similaires. Un ensemble de vibrisses est maintenu en contact avec une des texture pendant que le cylindre tourne et les vibrations ainsi mesurées sont enregistrées pour post-traitement.

Seules les 5 premières vibrisses de l'arc 1 sont utilisées : $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ et E1 (cf. fig. 2.7). La vitesse de rotation du cylindre est maintenue constante, générant une vitesse relative entre la texture et une vibrisse d'approximativement 0,12 m/s. 100 mesures de 3 s sont enregistrées pour chaque vibrisse et chaque texture.

2.3.3.2 Analyse des données

Comme cette expérience n'exploite pas l'information d'orientation des vibrisses, les mesures en x et y sont normées ($\sqrt{x^2 + y^2}$) afin de ne considérer que la déflexion absolue. L'analyse des données est effectuée dans le domaine fréquentiel car il a déjà été démontré que cette approche est efficace pour la discrimination de texture [Fend et al., 2003]. Plus spécifiquement, en considérant l'information de phase comme négligeable, la densité spectrale de puissance (*Power Spectral Density*, ou PSD) de chaque signal mesuré est calculée en utilisant la méthode du périodogramme de Welch moyenné [Welch, 1967]. Cette PSD décrit la distribution des puissances selon les fréquences. Ensuite, une analyse en composantes principales (*Principal*

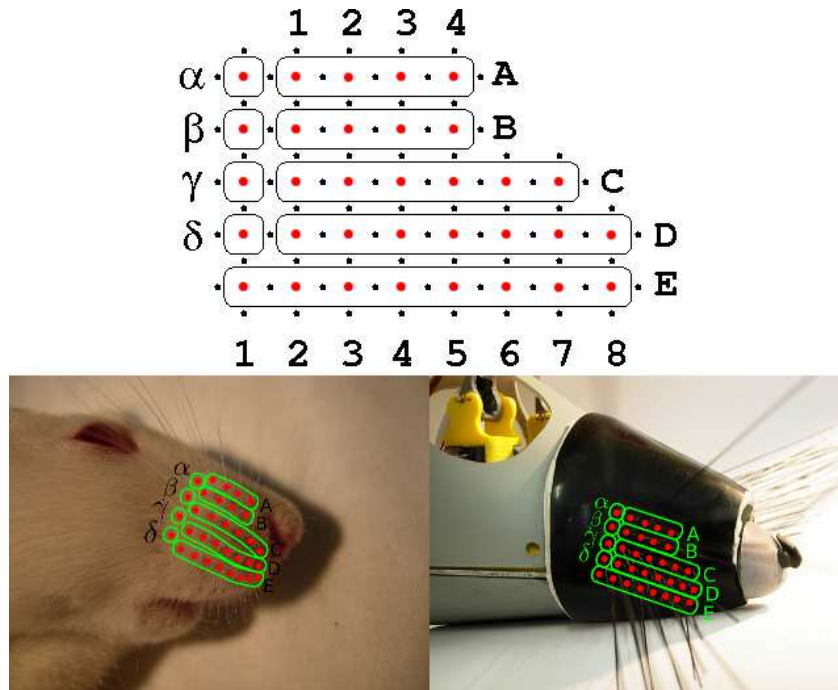


FIGURE 2.6 – Diagramme d'implantation des vibrissas. Haut : les ronds noirs correspondent aux points de référence et les ronds rouges aux points de mesure (vibrissas). Bas : comparaison entre l'implantation des vibrissas chez le rat et sur le système artificiel.

Component Analysis, ou PCA) est effectuée sur une matrice d'entrée de dimension $M \times N$, avec N le nombre de données et M le nombre de fréquences : $N = 100$ (mesures) $\times 5$ (vibrissas) $\times 4$ (textures) ; $M = 129$ (fréquences).

2.3.3.3 Discussion

On peut déduire des précédents résultats qu'une seule vibrisse est suffisante pour correctement discriminer des textures. En particulier, il a été montré que même les signaux de très faibles amplitudes générés par les textures 1 et 2 (papiers de verre de grain P100 et P60) peuvent être discriminés en utilisant la PSD. Cependant, la disparité des résultats obtenus suggère que la robustesse du système repose sur la nature complémentaire des informations apportées par chaque vibrisse individuellement. On peut noter par exemple que δ et γ , qui sont des vibrissas adjacentes et d'orientations très similaires par rapport aux textures (ce qui peut être vu sur la figure 2.7), produisent des signaux pourtant différents. En fait, la différence la plus évidente entre δ et γ concerne leur taille (ici, respectivement 168 mm et 232 mm). Une telle différence de taille implique une différence dans la fréquence de résonance qui, après mesure, est de 13 Hz pour δ et 18 Hz pour γ . En conséquence, une explication possible des différences observées pour les PSD de ces deux vibrissas pourrait

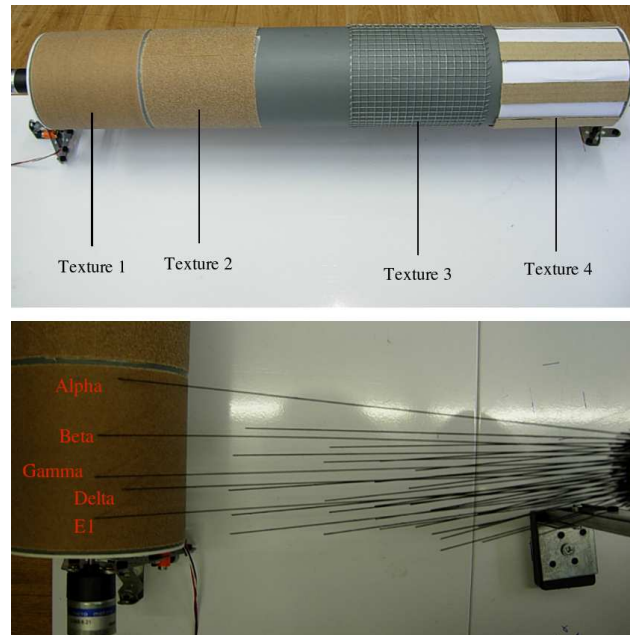


FIGURE 2.7 – Banc de test (haut). Texture 1 : papier de verre grain P100. Texture 2 : grain P60. Texture 3 : grillage métallique, maille carrée de 7 mm. Texture 4 : bandes de carton de 2 cm. Les 5 vibrisses en contact avec le banc de test (bas).

être que cette caractéristique mécanique produit une sorte de filtrage des vibrations et donc génère des PSD différentes. Ce filtrage pourrait amplifier les petites différences entre les textures, de sorte que l'utilisation conjointe d'un grand nombre de vibrisses de tailles différentes pourrait améliorer la discrimination de texture.

2.3.4 Extraction de caractéristiques

Ni les détails concernant l'encodage des textures, ni même la nature de ce codage, ne sont connus. Deux hypothèses principales s'affrontent actuellement concernant cet encodage :

L'hypothèse « de résonance » [Moore and Andermann, 2005, Neimark et al., 2003] qui soutient que les propriétés mécaniques de résonance des vibrisses jouent un rôle crucial dans la perception des textures. Cette résonance permettrait d'amplifier préférentiellement les signaux de faibles amplitudes et de fréquences proches de la fréquence de résonance de la vibrisse considérée. Cette hypothèse propose un parallèle fort avec le système auditif et la cochlée en prédisant un codage spatial des textures. Cette hypothèse possède l'élégant avantage d'expliquer l'utilité du gradient de taille des vibrisses.

L'hypothèse de « signature dynamique » [Arabzadeh et al., 2005] soutient, elle, que chaque vibrisse encode une sorte de signature du signal en terme de magnitude et de motif temporel. Sous cette hypothèse, la résonance des vibrisses serait finalement

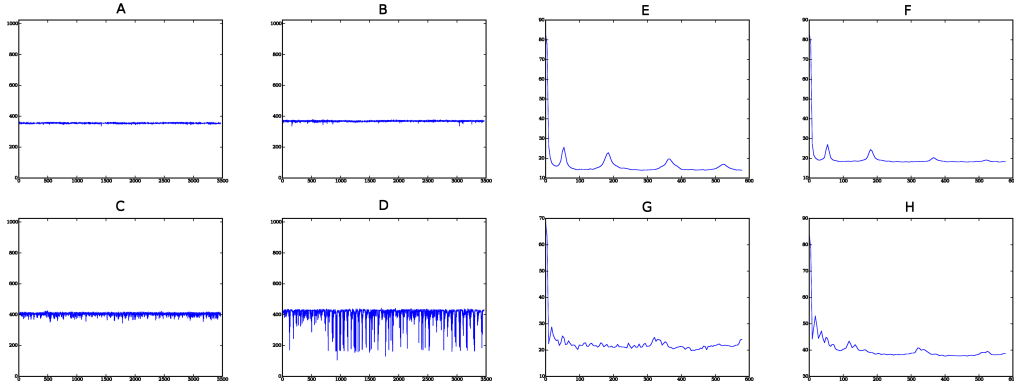


FIGURE 2.8 – Courbes typiques obtenues pour chaque texture avec la vibrisse δ (gauche). A=texture 1, B=texture 2, C=texture 3, D=texture 4. PSD correspondant moyenné sur 100 mesures (droite). E=texture 1, F=texture 2, G=texture 3, H=texture 4.

un effet collatéral, non crucial, dû aux propriétés mécaniques des vibrisses. Ainsi, une seule vibrisse suffirait à permettre la reconnaissance de texture.

Même s'il est indéniable que la matrice de vibrisses du rat est organisée selon un gradient [Brecht et al., 1997] (allant des vibrisses les plus longues à l'arrière vers les plus courtes à l'avant du museau) et que cela implique également un gradient dans les fréquences de résonances, il semble également que le rat soit capable de discriminer des textures au moyen d'une seule vibrisse [Hipp et al., 2006]. Plus récemment, Ritt et ses collègues [Ritt et al., 2008] ont montré une influence importante des propriétés de résonance dans la transduction des micro-mouvements induit par le contact entre la texture et la vibrisse. Au contraire, Wolfe et ses collègues [Wolfe et al., 2008] ont observé ces résonances, mais ont constaté qu'elles ne fournissent aucune information sur la texture. Le débat opposant ces deux théories est toujours d'actualité (voir par exemple [Ritt et al., 2008, Diamond et al., 2008, Ritt and Moore, 2008, Lottem and Azouz, 2009]).

Arabzadeh et al. (2004) ont expérimenté différents mécanismes d'encodage *in vivo*, d'une part, ainsi qu'avec des vibrisses artificielles, d'autre part. En partant du principe qu'une pure sinusoïde peut être décrite par son amplitude A et sa fréquence f , ils ont stimulé les vibrisses de rats avec différents signaux variant en amplitude et en fréquence. En enregistrant ensuite l'activité neuronale résultante dans le cortex à tonneaux, ils en ont déduit que cette activité encodait très probablement une quantité homogène au produit Af . En généralisant Af à tous signaux par $X\omega$ on obtient :

$$\int_{\Omega} \int_T |X(\omega, \tau)\omega| d\tau d\omega = \langle |X(\omega, \tau)|\omega \rangle_{\Omega, T} \quad (2.1)$$

Cette valeur est connue sous le terme de *equivalent noise level* (ENL) [Arabzadeh et al., 2005], niveau équivalent de bruit, quantité généralement utilisée comme

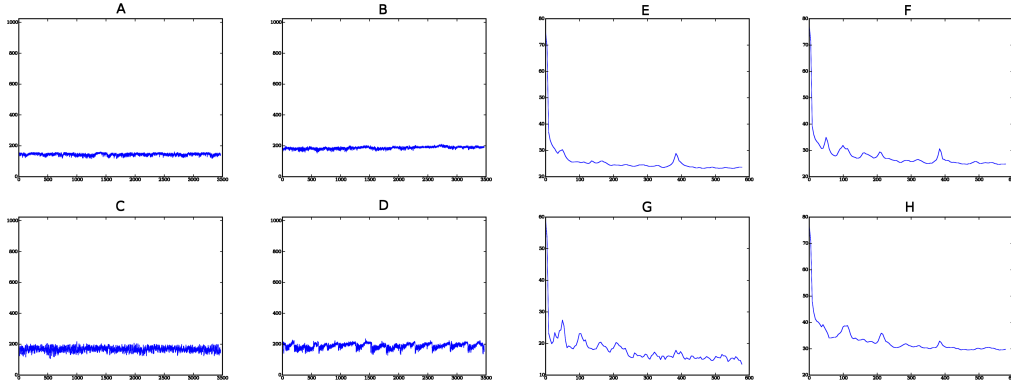


FIGURE 2.9 – Courbes typiques obtenues pour chaque texture avec la vibrisse γ (gauche). A=texture 1, B=texture 2, C=texture 3, D=texture 4. PSD correspondant moyenné sur 100 mesures (droite). E=texture 1, F=texture 2, G=texture 3, H=texture 4.

mesure de puissance sonore. l'ENL représente l'amplitude moyenne de bruit blanc dissipant la même puissance moyenne que le signal. Cette valeur permet de caractériser la signature dynamique d'un signal en une seule valeur, la valeur moyenne du produit $X\omega$.

On peut interpréter cette quantité comme reliée à l'énergie selon la définition de Teager-Kaiser [Kaiser, 1990]. Cette interprétation permet de voir l'énergie d'un signal comme similaire à l'énergie d'une masse en oscillation harmonique. Si l'on prend une masse m suspendu à un ressort de tension constante k on peut obtenir l'énergie en résolvant une équation différentielle du second ordre :

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 X^2 \quad (2.2)$$

avec X l'amplitude d'oscillation et ω la fréquence. Cette interprétation semble raisonnable dans la mesure où l'on utilise généralement le niveau de pression sonore pondéré par la fréquence pour caractériser le niveau sonore, afin de refléter la réponse spectrale non plate de l'audition.

Fox et ses collègues [Fox et al., 2009] ont obtenu de bons résultats de reconnaissance de textures sur un robot mobile en utilisant le centroïde spectral, caractéristique proche de l'ENL. Le centroïde spectral, également appelé « moment spectral de premier ordre », est généralement donné par :

$$\frac{\int_{\Omega} \int_T |X(\omega, \tau)| \omega d\tau d\omega}{\int_{\Omega} \int_T |X(\omega, \tau)| d\tau d\omega} \quad (2.3)$$

On peut remarquer que le centroïde spectral est homogène à une fréquence moyenne pondérée par l'amplitude. Il représente le « centre de gravité » du spectre. Cette caractéristique est assez largement utilisé en classification de musique et décrit assez

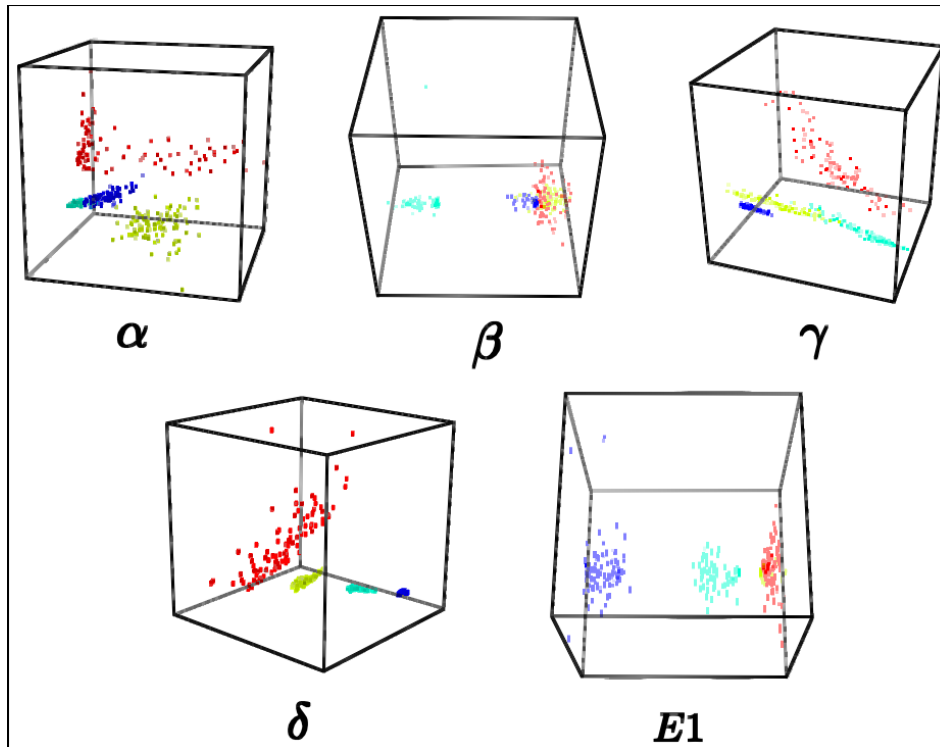


FIGURE 2.10 – Résultats de l’analyse en composantes principales projetés sur les 3 principales dimensions, pour chacune des 5 vibrisses. Rouge : texture 1 ; jaune : texture 2 ; bleu : texture 3 ; cyan : texture 4.

bien le « timbre » sonore. L’ENL est, en fait, égal au centroïde spectral multiplié par la puissance du signal [Hipp et al., 2006].

Si toutes ces caractéristiques se basent sur une estimation de la fréquence, il reste que la question de cette estimation n’est pas triviale. Comment le cerveau effectue-t-il cette estimation ? Les ingénieurs utilisent généralement une transformation de Fourier mais, même si cela constituerait une magnifique preuve de la puissance de l’évolution, nous ne pensons pas qu’une telle fonction existe dans le cerveau et proposons plutôt un algorithme simple permettant d’estimer à la volée la quantité $X\omega$ dans le domaine temporel [N’Guyen et al., 2010a].

Dans un premier temps, le signal source est réduit à ses extrema locaux – les zéros de la dérivée –, ce qui constitue une réduction drastique de la quantité d’information à traiter. Cette fonction que nous appelons « détecteur de pics » génère donc un train de pics synchrone conservant l’information des extrema locaux ainsi que la périodicité du signal.

$$P(x) = \begin{cases} x & \text{si } \frac{dx}{dt} = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.4)$$

Nous obtenons un train de pics $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$.

Nous faisons ici l'hypothèse que ce train de pics conserve assez d'information pour décrire une texture. Pour étayer cette hypothèse, on peut citer les premiers travaux de Licklider [Licklider and Pollack, 1948] en psycho-acoustique, lequel a testé les effets de diverses distorsions du signal sur la capacité de l'humain à reconnaître la parole. Certaines des distorsions testées étaient basées sur l'écrêtage infini – *infinite clipping* – qui conservait seulement la périodicité du signal, dans la mesure où il le transformait en un signal carré d'amplitude fixe dont le changement de front correspondait au passage du signal source par zéro. En dépit d'une telle réduction d'information les sujets testés conservaient de très bonnes performances en reconnaissance de la parole. De la sorte, il semble donc raisonnable de penser qu'une distorsion telle que le détecteur de pics devrait permettre de conserver assez d'information pour reconnaître une texture.

Une simulation de la réponse d'une population de mécano-récepteurs à des signaux simples permet également d'apprécier le lien que nous faisons entre la biologie et l'extraction de pic. Le modèle utilisé ici est le modèle de Freeman et Johnson [Freeman and Johnson, 1982b, Freeman and Johnson, 1982a, Slavik and Bell, 1995]. Ce modèle de mécano-récepteurs de la peau des macaques est assez simple (4 degrés de liberté) mais est suffisant pour cette démonstration. La figure 2.11 montre la réponse d'une population de 100 mécano-récepteurs de type SA à une sinusoïde de fréquence 100 Hz et d'amplitude 1 (à gauche) et d'amplitude 2 (à droite). Dans ce modèle, la seule différence entre les types RA et SA est la constante de temps de la membrane (40 ms pour les RA et 60 ms pour les SA) et les deux types donnent sensiblement le même résultat dans cette simulation. On peut considérer que l'extraction de pics se comporte grossièrement comme une population de mécano-récepteurs.

Une fois l'extraction de pics effectuée, la période inter-pics τ est calculée :

$$\tau_n = t_{P_{n+1}} - t_{P_n} \quad (2.5)$$

dans le but d'obtenir une estimation grossière de la fréquence $f = \frac{1}{\tau}$. Finalement, on calcule la moyenne dans une fenêtre temporelle de l'amplitude des pics multipliée par la fréquence estimée pour obtenir notre caractéristique. Cette caractéristique, que nous nommons « puissance moyenne instantanée » (IMP), est bien homogène à l'ENL $X\omega$ aux approximations près, ce qui se vérifie facilement pour une sinusoïde pure.

$$IMP = \langle P_n \frac{1}{\tau_n} \rangle_n = \langle P_n f_n \rangle_n = \langle P f \rangle \quad (2.6)$$

On peut constater que cet algorithme est computationnellement très léger puisqu'il ne nécessite à chaque pas de temps qu'une soustraction $x_t - x_{t-1}$, ainsi qu'une comparaison pour la détection de pics, une incrémentation pour le calcul de la période inter-pics et une division $\frac{P_n}{\tau_n}$. Le résultat est ensuite moyenné selon un filtrage passe-bas adéquat. La figure 2.12 montre le comportement de IMP à des stimulations sinusoïdales simples de différentes amplitudes et fréquences. Ici le filtrage est

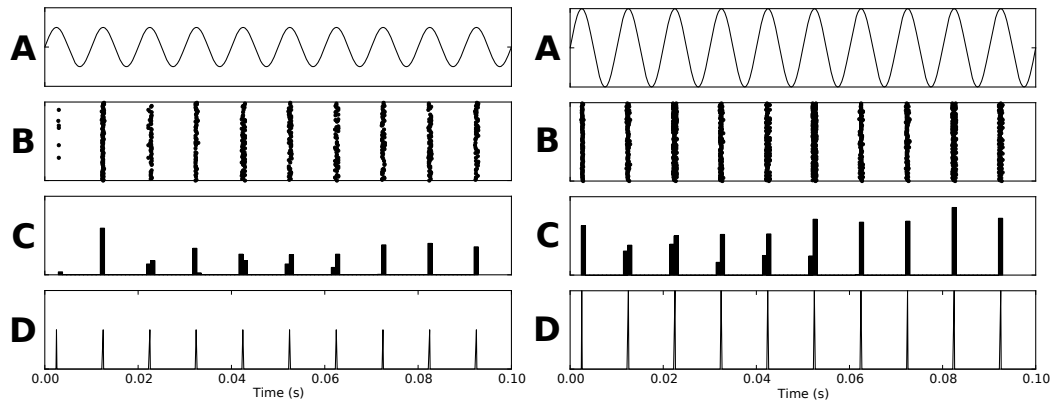


FIGURE 2.11 – Comparaison qualitative du modèle de Freeman et Johnson et de l'extraction de pics avec une stimulation sinusoïdale. A : sinusoïde de fréquence 100 Hz et d'amplitude 1 (gauche) et 2 (droite). B : « raster plot » de la population de 100 mécano-récepteurs. C : histogramme des *spikes* de la population. D : extraction de pics.

une simple moyenne glissante dans une fenêtre de 10 ms. On peut constater des pics dans l'IMP dus aux transitions brutales entre les signaux au passage entre B et C, et C et D.

D'un autre côté, cet algorithme engendre une réduction d'information drastique. Il est clair, en effet, qu'une sinusoïde aura la même valeur d'IMP qu'un signal triangulaire de même fréquence fondamentale et de même amplitude. Appliqué au système de vibrisses artificielles, cet algorithme permet à chaque vibrisse individuelle de fournir une information grossière sur la signature dynamique du signal. Ainsi, dans un cas idéal, si l'on considère que chaque vibrisse agit comme un filtre passe-bande, grâce au gradient des fréquences de résonances dans la matrice de vibrisses, une décomposition du signal est effectuée, ce qui devrait permettre de lever l'ambiguïté entre deux signaux de même fréquence fondamentale. Le système ainsi décrit repose donc sur les deux hypothèses d'encodage des textures précédemment évoquées.

Ce système possède quelques similarités avec certains modèles d'audition pour l'extraction de caractéristique – généralement utilisés pour la reconnaissance de la parole – tel que le modèle ZCPA [Ghitza, 1994, Kim et al., 1999, Sreenivas and Niederjohn, 1992]. En effet, dans ZCPA, le signal est d'abord décomposé par un modèle de cochlée (banc de filtres passe-bandes), puis il accumule dans un histogramme pour chaque canal les périodes détectées par un passage par zéro du signal. Les valeurs de pics sont également utilisées pour pondérer l'histogramme de périodes. Tous les histogrammes résultants sont sommés afin d'obtenir une estimation du spectre.

Une étude en simulation des liens possibles entre toucher et audition pour la reconnaissance de textures (tactiles et sonores) est en cours à l'ISIR et semble également valider ce rapprochement [Bernard et al., 2010b].

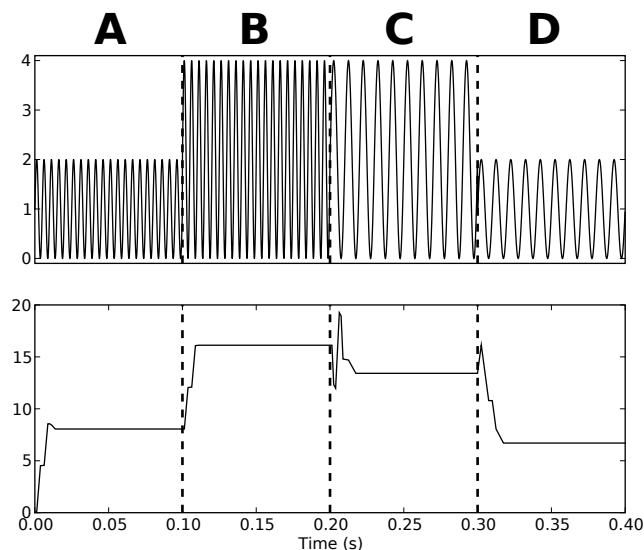


FIGURE 2.12 – Stimulation sinusoïdale (haut) et la réponse IMP correspondante (bas). A : sinusoïde d’amplitude 1 et de fréquence 200 Hz. B : amplitude 2 fréquence 200 Hz. C : amplitude 2 fréquence 100 Hz. D : amplitude 1 fréquence 100 Hz.

2.4 Expériences

2.4.1 Tête fixe

2.4.1.1 Dispositif expérimental

Tout d’abord, nous avons testé notre système haptique selon une expérience relativement contrainte avec tête fixe, consistant à frotter (balayer) les vibrisses sur un jeu de 8 papiers de verre dont le grain varie de P180 à P50 (cf. Fig 2.13). Le papier de verre fournit une texture complexe aléatoire appropriée pour ce genre de tâche et a été utilisé dans différentes expériences avec des rats réels [Hipp et al., 2006, Arabzadeh et al., 2005, Wolfe et al., 2008]. Avec ces textures nous avons effectué des expériences qualitatives sur des humains, montrant clairement que la tâche consistant à les reconnaître par contact tactile uniquement est très difficile. Cette observation a également été faite par Hipp et ses collègues (2005).

Une matrice de vibrisses est fixée sur la tête du robot qui peut bouger selon les directions pan et tilt. L’axe pan est à une distance fixe de l’échantillon de texture (cf. Fig 2.14) qui est présenté avec une légère variabilité en position ($\sim \pm 1$ cm) entre chaque expérience, avec un angle approprié de façon à permettre un contact avec un maximum de vibrisses.

Pour chaque texture, 400 expériences sont effectuées, 300 pour l’apprentissage et 100 pour les tests. Les données brutes (déflexion selon x et y, 8 bits de résolution échantillonnées à 1 157 Hz) sont normées ($\sqrt{x^2 + y^2}$). Pour chaque vibrisse, cette mesure est fournie à l’algorithme d’extraction de descripteur qui retourne la

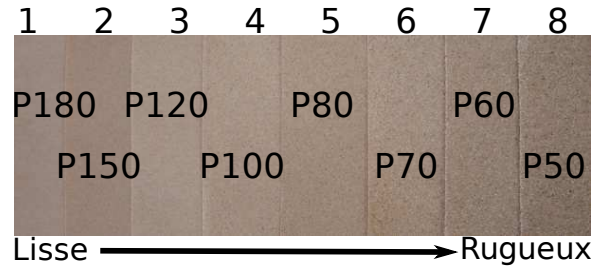


FIGURE 2.13 – Jeu de textures utilisé pour la tâche de discrimination.

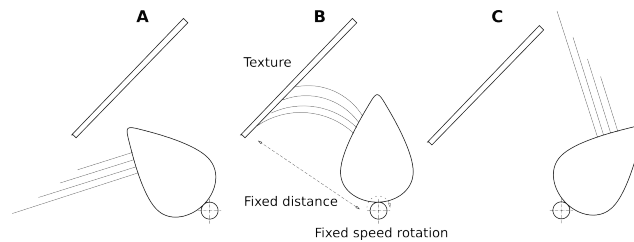


FIGURE 2.14 – Schéma du protocole expérimental. A : position de départ ; B : position médiane ; C : position finale.

quantité IMP (réel flottant). Finalement, les valeurs IMP sont sommées pour chaque vibrisse pendant un balayage. On obtient alors un vecteur d'entrée de 33 flottants pour chaque essai, lequel est fourni à un simple perceptron multi-couches (MLP) composé de 33 neurones en entrée, 33 neurones en couche cachée et 8 neurones en sortie, afin de réaliser un apprentissage supervisé. La librairie FANN [Nissen, 2003] avec l'algorithme d'apprentissage iRPROP [Igel and Hüskel, 2000] est utilisée. La classification finale est obtenue par un *winner-takes-all* (WTA) sur les 8 neurones de sortie.

2.4.1.2 Résultats

Le tableau 2.2 donne la matrice de confusion obtenue sur 100 essais tests. La performance moyenne est clairement au dessus de 90 % (ici, l'espérance est de $\frac{1}{8} = 12,5\%$), ce qui est bien meilleur que les performances des humains pour cette tâche.

En utilisant les données ainsi obtenues, nous avons testé l'influence du nombre de vibrisse sur les performances de classification. En commençant par les données obtenues avec un seul arc (Arc 1, 5 vibrisse cf. tableau 2.1), puis deux arcs (Arc 1 + Arc 2, 10 vibrisses) etc, jusqu'à utiliser toute la matrice, nous avons observé à chaque étape la qualité de classification. Les résultats sont présentés sur la figure 2.16. Le pourcentage de réussite augmente rapidement avec le nombre de vibrisses impliquées, pour stagner autour de 90 à 95 % quand 3 arcs ou plus (15 vibrisses) sont utilisés. Ce résultat confirme ceux précédemment obtenus dans [Fend et al., 2003, Hipp et al., 2006].

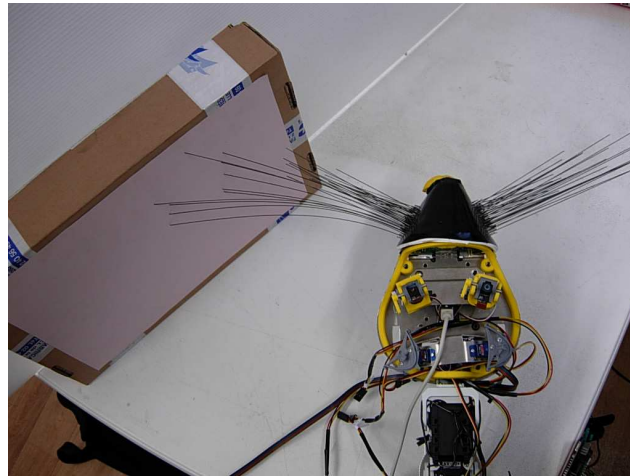


FIGURE 2.15 – Protocole expérimental vu du dessus.

TABLE 2.2 – Matrice de confusion obtenue pour les 8 textures en utilisant le descripteur IMP.

IMP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	100	0	0	0	0	0	0	0
2	0	99	1	0	0	0	0	0
3	0	2	95	0	3	0	0	0
4	0	0	0	96	4	0	0	0
5	0	0	1	0	99	0	0	0
6	0	0	0	0	1	93	6	0
7	2	0	6	0	3	9	80	0
8	2	0	0	0	0	1	0	97

En analysant les performances obtenues avec un seul arc (cf. Fig 2.17), on peut observer une grande variabilité. En effet, il semble que chaque arc, pris séparément, fonctionne mieux sur un sous-ensemble de textures. Par exemple, l'arc 2 est très mauvais pour la reconnaissance de la texture 5, mais très bon pour la texture 6. Ceci suggère que les arcs (comprenant des vibrisses de tailles similaires) se complètent les uns les autres et explique probablement l'augmentation des performances avec le nombre d'arcs utilisés.

La qualité de ces résultats démontre que l'IMP est un descripteur adapté pour la reconnaissance de texture. Cependant, comme Fox et al. (2009) l'ont souligné, ce genre de tâche contrainte, avec une tête fixe, est très différente du cas d'un robot se déplaçant librement dans son environnement, pour lequel les distances et angles selon lesquels les vibrisses touchent les textures varient constamment. C'est pourquoi, afin de vérifier la robustesse du descripteur IMP, nous avons également effectué une telle expérience.

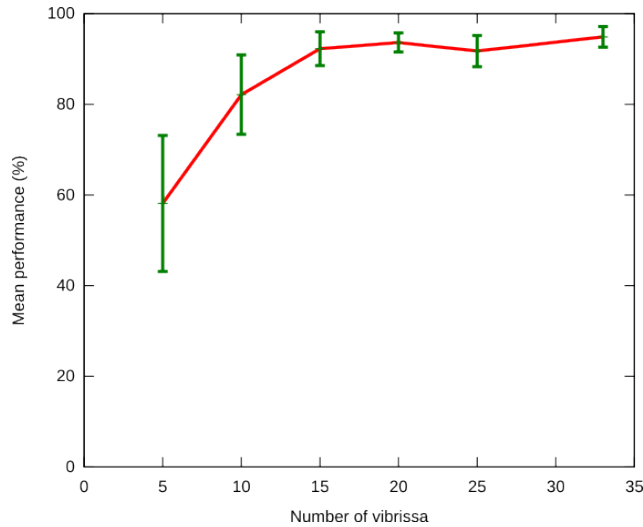


FIGURE 2.16 – Performance moyenne (pourcentage de classifications correctes) obtenue avec le descripteur IMP, par rapport au nombre de vibrisses utilisées.

2.4.2 Robot mobile

2.4.2.1 Dispositif expérimental

Dans cette expérience, un ensemble de textures en plexiglass (cf. fig. 2.18) est fixé sur les murs de deux couloirs (1 m de long). Une texture différente est assignée à chaque mur de chaque couloir. La tâche du robot consiste alors à suivre les murs de l’environnement, à entrer dans un couloir s’il en rencontre un, à reconnaître les textures sur les cotés et à tourner à gauche ou à droite à la fin du couloir selon la combinaison de texture gauche/droite reconnue. Une différence essentielle avec l’expérience précédente (tête fixe) est ici la stratégie de contact entre les vibrisses et la texture. Dans l’expérience « tête fixe », les vibrisses étaient frottées contre une texture en effectuant une rotation de la tête afin de maximiser le nombre de vibrisses en contact avec la texture. Ici, c’est le robot qui se déplace, la tête ne tournant pas, et seul un sous-ensemble (~ 10 vibrisses, les deux plus longs arcs) des vibrisses touche vraiment les textures, à une distance variable (selon la trajectoire du robot).

Afin de permettre au robot de naviguer dans son environnement en utilisant uniquement ses vibrisses comme information sensorielle, nous avons implémenté une simple stratégie d’évitement d’obstacle. Tout d’abord, une information de distance est calculée en prenant en compte les arcs d’iso-longueurs, en utilisant la déflexion moyenne d’un arc pondérée par la longueur moyenne des vibrisses de cet arc. Donc, plus les vibrisses sont courbées, plus la distance calculée en sortie est petite. En répétant ce calcul pour chaque arc on obtient une valeur décroissant avec la distance de contact :

$$D = \frac{1}{N} \sum (1 - V_i) \times L_i \quad (2.7)$$

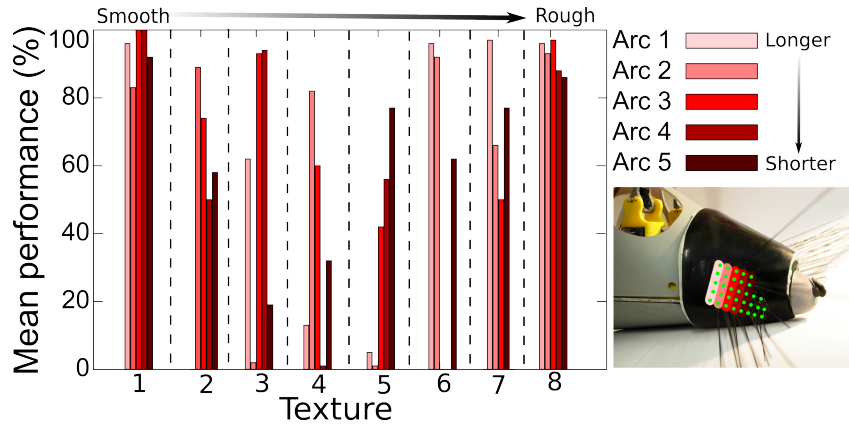


FIGURE 2.17 – Performance moyenne obtenue pour les 5 plus grands arcs de vibrisses sur les 8 textures.

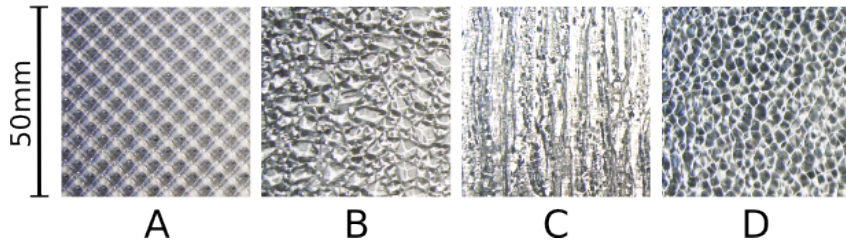


FIGURE 2.18 – Les 4 textures utilisées pour les expériences sur robot mobile. Ces textures sont en plexiglass décoré.

V_i étant la déflexion moyenne du $i^{\text{ème}}$ arc et L_i la longueur moyenne du $i^{\text{ème}}$ arc. On peut remarquer que les vibrisses les plus courtes – les plus frontales – contribuent moins à cette mesure de distance que les plus longues. Ceci peut paraître contre-intuitif puisque, lorsqu'un objet touche les vibrisses les plus courtes, il est probablement plus proche que s'il ne touche que les plus longues [Brecht et al., 1997]. Cependant, généralement dans la tâche décrite, lorsqu'un objet touche les vibrisses les plus courtes, il touche également les plus longues, de sorte que cette pondération permet d'éviter les sur-réactions du système. De plus, cette méthode a montré une meilleure stabilité dans les couloirs, où une petite variation de déflexion des vibrisses doit provoquer une petite réaction dans l'orientation du robot afin de produire une trajectoire la plus droite possible. Cette stratégie de « centrage » est une composante importante du comportement du robot puisque la largeur des couloirs est seulement de 35 cm alors que la largeur du robot est de 25 cm (en comptant les roues) et que la portée maximale des vibrisses est de 50 cm, laissant seulement une faible marge d'erreur pour une trajectoire stable et pour éviter la casse de vibrisses (cf. Fig 2.19). Le robot est contrôlé par un vecteur vitesse V appliqué à l'axe du cou dont la composante d'orientation V_y est donnée par :

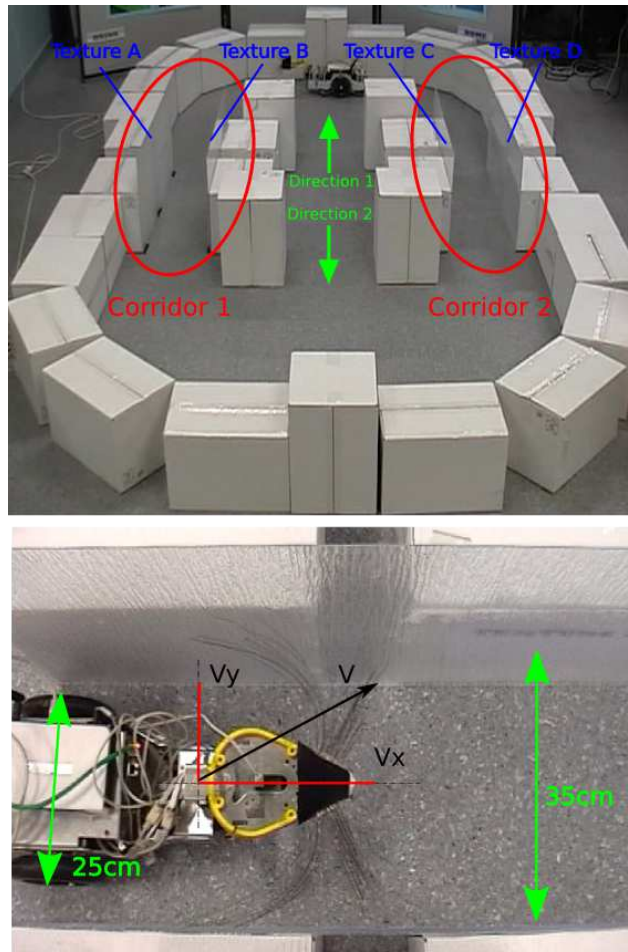








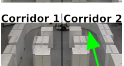

FIGURE 2.19 – Environnement du robot montrant les 2 couloirs ainsi que la convention utilisée pour les directions (haut). Le robot dans un couloir avec les dimensions et le vecteur de commande du robot (bas).

$$V_y = (D_{left} - D_{right}) \times G \quad (2.8)$$

Avec le gain $G = 0.01$. V_x , la vitesse de translation est fixée à 10 cm/s. Cette simple loi de contrôle produit un comportement d'évitement d'obstacle avec une tendance au suivi de mur. De plus, cette loi de contrôle produit un comportement relativement simple de centrage dans les couloirs, ce qui était l'objectif principal. Finalement, en utilisant les valeurs D_{left} et D_{right} , il est possible de déterminer grossièrement la largeur de l'ouverture d'un couloir et ainsi de déclencher, grâce à l'utilisation d'un seuil, la procédure d'apprentissage/reconnaissance quand le robot est à l'intérieur d'un couloir.

Nous avons tout d'abord conduit une série de 10 expériences pour chaque couloir et chaque direction. Le robot était simplement positionné approximativement en

TABLE 2.3 – Matrice de confusion obtenue pour 20 essais dans chaque couloir et chaque direction.

Recognized \ Actual Case				
	75	15	10	0
	0	100	0	0
	15	0	85	0
	0	15	0	85

face d'un couloir et la valeur IMP était enregistrée à chaque pas de temps dans ce couloir. Les données de 7 essais furent utilisées pour l'apprentissage d'un MLP (2×33 neurones en couche d'entrée, 2×33 neurones en couche cachée et 4 neurones en sortie), gardant les 3 autres essais pour tester la qualité de l'apprentissage. La taille typique des données d'un essai était de $\sim 7\,000$.

2.4.2.2 Résultats

Une fois l'apprentissage terminé, une série additionnelle de 20 essais fut effectuée afin d'évaluer la capacité du robot à tourner dans la bonne direction à la fin de chaque couloir. Pendant que le robot était dans un couloir, les valeurs lissées (filtre passe-bas) des 2×33 sorties IMP étaient données en entrée du MLP précédemment appris et la valeur de sortie était calculée par WTA. En accumulant cette valeur de sortie pendant tout le couloir, un vecteur de décision moyen était acquis qui servait à prendre la décision finale (encore une fois par WTA). Les résultats correspondants sont résumés dans le tableau 2.3. Comme cela était prévu, la stabilité de la trajectoire joue un rôle dans la performance, les « tremblements » de la trajectoire dans le couloir induisant des variations dans la perception des vibrations. La plupart des erreurs se sont produites lorsque la trajectoire du robot était instable.

Nous avons finalement conduit des expériences qualitatives dans un labyrinthe complet en utilisant les règles de navigation décrites précédemment. Le labyrinthe se compose d'un rectangle aux coins arrondis de 2,20 m par 4,10 m, composé de boîtes en carton, avec 2 couloirs (cf. fig. 2.19). Un simple comportement câblé à la main à été ajouté, consistant à tourner à gauche ou à droite à la fin du couloir en fonction des textures reconnues. Le robot est initialement positionné près d'un mur en haut du labyrinthe avec une orientation vers la gauche ou vers la droite. N'importe quelle autre position de départ pourrait être utilisée avec la limitation d'éviter que le robot ne soit directement en face d'un mur, aucun comportement de demi-tour n'ayant été implémenté. Dans ces conditions, le robot a pu circuler dans le labyrinthe avec succès, suivant les directions indiquées par les textures dans les

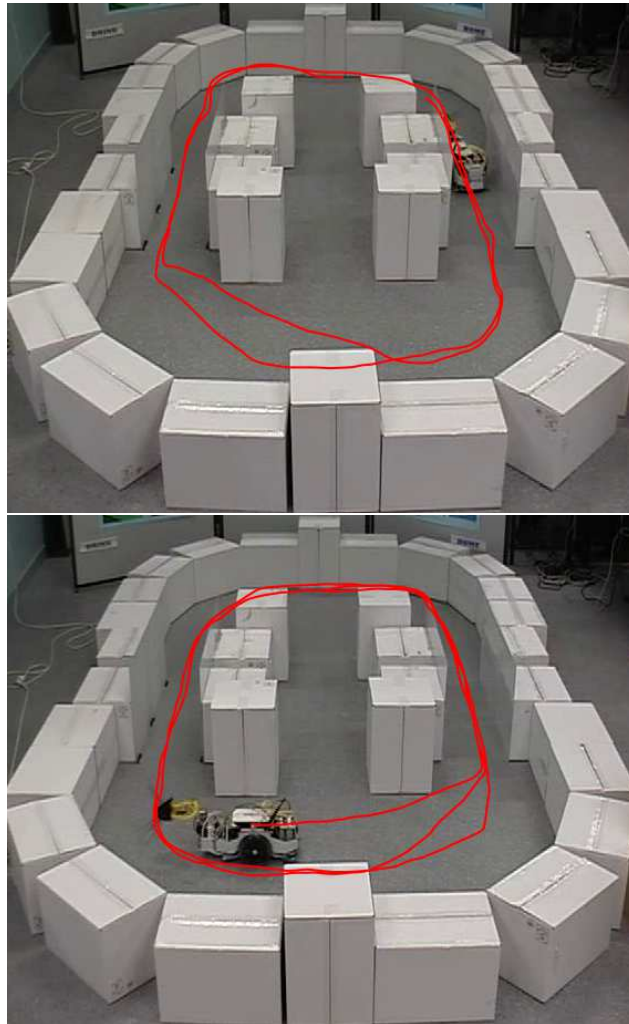


FIGURE 2.20 – Trajectoire typique du robot dans le labyrinthe. Haut : départ orienté vers la gauche. Bas : départ vers la droite.

couloirs. Plusieurs tours à la suite ont pu être effectués, démontrant ainsi l'efficacité du système haptique.

La figure 2.20 montre un exemple du genre de trajectoire obtenue.

2.4.3 Reconnaissance de formes

Très peu de travaux ont été effectués dans le domaine de la reconnaissance ou reconstruction de formes en utilisant des vibrisses [Russell, 1992, Solomon and Hartmann, 2006, Kim and Moller, 2007].

Un des problèmes majeurs au sujet de la reconnaissance de formes concerne la transformation spatio-temporelle nécessaire à la construction d'une représentation de l'objet. En effet, contrairement à la vision, le toucher avec les vibrisses ne per-

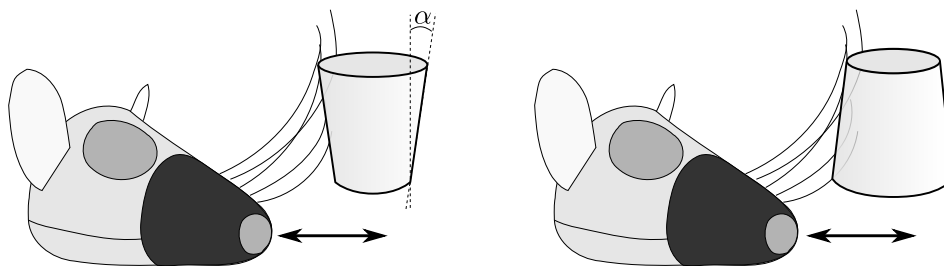


FIGURE 2.21 – Dispositif expérimental de l’expérience de reconnaissance de formes. À gauche, gobelet droit ; à droite, gobelet retourné. $\alpha = 9,5^\circ$

met pas d’acquérir directement une image « globale » de l’objet. Au moyen des vibrisses, il est donc nécessaire d’explorer l’objet, par un mouvement de *whisking* par exemple (également couplé avec des mouvements de la tête). Se présente alors la difficulté de transformer des informations temporelles variant pendant un *whisk* en une représentation spatiale.

Quelques travaux ont été conduits sur ce sujet [Mitchinson et al., 2006, Ahissar and Knutsen, 2008], reliant le minutage précis du mouvement de *whisking* à des positions dans l’espace.

Nous avons exploité ici une autre possibilité, celle d’utiliser des informations de bords en capitalisant sur le fait que notre système vibrissal artificiel nous permet de mesurer les déflexions en deux dimensions et, donc, de calculer les orientations des bords. Nous sommes encouragés en cela par le fait que l’existence de cartes de directions (cartes neuronales encodant les directions des déflexions) à l’intérieur de chaque tonneau a été démontrée [Bruno et al., 2003, Andermann and Moore, 2006].

La figure 2.21 décrit le dispositif expérimental, ici très simple, consistant à effectuer des mouvements de translation de la tête d’avant en arrière afin de provoquer le contact des vibrisses sur la surface d’un gobelet. Ce mouvement simule en quelque sorte le *whisking*.

À chaque *whisk* nous enregistrons les directions de déflexion de toutes les vibrisses (du côté considéré) lorsque l’amplitude de déflexion dépasse un certain seuil (afin de ne prendre en compte les données que pendant le contact avec l’objet).

Résultats Pour chaque cas (gobelet droit et retourné), nous effectuons 20 mouvements de *whisk* fournissant environ 200 mesures d’angles. 100 mesures servent à l’apprentissage par un MLP (33 neurones en entrée, 33 en couche cachée et 2 en sortie) et 100 pour les tests.

Le système est capable de reconnaître le gobelet droit dans 100 % des cas et le gobelet retourné dans 99,33 % des cas.

2.5 Discussion

Reconnaissance de textures sur robot mobile Si un certain nombre d'efforts de recherche ont été dévolus à la reconnaissance de texture dans des tâches de type « tête fixe » [Fend et al., 2003, Lungarella et al., 2002, Kim, 2004, Fox et al., 2009], très peu de robots ont été capables de naviguer et de reconnaître des indices tactiles dans un environnement moins contraint en utilisant des vibrisses.

Un travail de ce type a été effectué en utilisant des capteurs de courbure, avec deux catégories de surfaces différentes que l'on pourrait considérer davantage comme des « formes » que comme des « textures » (des alignement de pointes), puisqu'elles semblent induire une simple séquence de déflexion plutôt qu'une vibration complexe [Seth et al., 2004]. Ce robot a pu être conditionné à associer une réponse aversive à une certaine texture.

D'autres travaux concernent une tâche de discrimination, de type « lisse » versus « rugueux » dans une zone ouverte, en utilisant des vibrisses actives basées sur des microphones à électret et de vrais poils de rat [Fend, 2005]. L'extraction de caractéristiques était basée sur l'analyse spectrale et a conduit à de bons résultats qualitatifs. Cependant, comme l'auteur le précise, un tel système ne peut pas être utilisé pour effectuer une tâche plus complexe sans amélioration de ses capacités de discrimination ainsi que de sa fiabilité.

Finalement, Fox et al. (2009) ont également obtenu de bons résultats dans une tâche de discrimination lisse/rugueux sur un robot mobile équipé de vibrisses actives et utilisant la caractéristique *onset*. Cette caractéristique *onset* est grossièrement l'amplitude de la FFT dans une bande de fréquences étroite (2-3 kHz) durant la période « d'attaque » (*onset*) du contact entre la vibrisse et la texture (les premières 12,8 ms de contact). De plus, selon les auteurs, cette caractéristique du signal semble invariante par rapport à la position relative et à l'orientation des vibrisses et des textures. Les conditions expérimentales différaient quelque peu des nôtres, puisque la position de la texture était choisie au hasard et que le robot ne bougeait pas pendant qu'il touchait la texture.

Aucune de ces approches ne semblent adaptée pour effectuer une tâche plus complexe qu'une simple discrimination de texture de type lisse/rugueux. En revanche, le système haptique décrit ici a prouvé sa capacité à utiliser la reconnaissance de texture afin de produire des capacités minimales de navigation dans un environnement complexe. De telles capacités doivent pouvoir être utilisées pour compléter la vision dans de bonnes conditions d'éclairage, ou de la remplacer dans le noir. Avec ce système haptique, la reconnaissance de texture est possible dans des conditions de « tête fixe » ou de plateforme mobile. Ceci tend à indiquer qu'en dépit de la simplicité de l'algorithme utilisé et des nombreuses approximations sur lesquelles il repose, la caractéristique IMP est robuste.

Inversement, nous avons déjà mentionné le fait que l'orientation des vibrisses dans notre système n'est pas toujours bien adaptée. En effet, les vibrisses de Psi-kharpax sont orientées vers l'avant (cf. fig. 2.15), ce qui empêche occasionnellement que toutes les vibrisses touchent la texture. À l'intérieur du couloir, par exemple,

seulement 10 vibrisses environ touchent le mur. De plus, cette implémentation implique parfois de brusques « sauts » de certaines vibrisses lorsqu'elles sont « coincées » sur une surface, au lieu d'un frottement régulier, ce qui rend leurs signaux peu fiables. Heureusement, ce problème n'apparaît que dans les couloirs et n'implique qu'une minorité de vibrisses (généralement les plus dorsales et les plus ventrales) et donc le réseau de neurones responsable de la reconnaissance des textures peut les considérer comme du bruit. Évidemment, un système dans lequel l'orientation des vibrisses pourrait être contrôlé dynamiquement – comme celui utilisé dans [Fox et al., 2009] – serait plus adapté pour éviter ce problème et serait plus proche du système de vibrisses actives du rat.

Hypothèses de résonance/signature dynamique Une autre remarque concerne la technique d'extraction de caractéristiques. Nous avons utilisé un algorithme permettant d'extraire une estimation du produit amplitude \times fréquence. Ce choix fut basé sur la découverte récente de la façon dont les signaux des textures sont encodés dans le cerveau du rat [Arabzadeh et al., 2004]. En utilisant cette caractéristique, il a été possible d'effectuer une reconnaissance de texture très fine. Ce résultat est un argument en faveur de l'hypothèse de « signature dynamique » qui postule que chaque vibrisse encode une signature spécifique de la surface en contact en terme d'amplitude et de motif temporel.

Pareillement, le fait que nos résultats suggèrent que les capacités de reconnaissance de texture dépendent à la fois de la taille et du nombre de vibrisses mis en jeu, semble conforter l'hypothèse de « résonance » [Moore and Andermann, 2005, Neimark et al., 2003] qui postule que les propriétés de résonance des vibrisses jouent un rôle crucial dans la transduction des vibrations et, d'une certaine manière, aident à améliorer la perception des textures. La façon exacte dont cette propriété de résonance est exploitée par les rats n'est toujours pas claire, mais il semble assez raisonnable de penser qu'une sorte de filtrage du signal intervient. Des expériences additionnelles devraient pouvoir clarifier ce point. Quoi qu'il en soit, les résultats déjà obtenus suggèrent fortement que les deux hypothèses actuellement considérées comme mutuellement exclusives pour expliquer la reconnaissance des textures chez le rat – c'est à dire l'hypothèse de « signature dynamique » et l'hypothèse de « résonance » – sont peut être, en fait, complémentaires.

Reconnaissance de formes Concernant la reconnaissance de formes, les travaux préliminaires menés sur une expérience très simple, montrent qu'il est possible d'utiliser des informations d'orientation à cette fin. Bien que nous n'ayons pas, à proprement parler, extrait explicitement des informations de bords (au sens habituel du traitement d'images), le contact de la matrice vibrissale sur le bord d'un objet effectue naturellement cette fonction. Il a ainsi été possible, en utilisant les informations d'orientation de déflexion, de reconnaître avec un très fort taux de réussite ($\sim 100\%$) l'orientation d'un bord de seulement $9,5^\circ$.

Les tonneaux du cortex à tonneaux possèdent individuellement des cartes

d'orientation codant pour l'orientation de déflexion [Bruno et al., 2003, Andermann and Moore, 2006]. De plus, il semble que le cortex à tonneaux soit également capable d'intégrer l'information sur toute la matrice, et ainsi de répondre aux orientations et aux mouvements cohérents sur la matrice [Jacob et al., 2008]. La méthode proposée ici, même si elle ne représente qu'un travail préliminaire, peut donc se justifier d'un point de vue biologique et son amélioration fera l'objet de futurs travaux.

Systeme auditif

Sommaire

3.1	Introduction	39
3.2	Biologie	40
3.2.1	Transduction	40
3.2.2	Chemin neuronal	43
3.3	Systeme auditif artificiel	45
3.3.1	Transduction	45
3.3.2	Modèle	46
3.4	Expériences	51
3.4.1	Localisation	51
3.4.2	Séparation de sources	53
3.4.3	Reconnaissance	53
3.5	Discussion	54

3.1 Introduction

La perception auditive implique la transmission par un médium (l'air, l'eau) des ondes mécaniques produites par un événement extérieur à une partie du corps de l'animal, partie dont les résonances sont ensuite transformées en impulsions électriques. L'audition est un sens extrêmement sensible. En effet, l'audition humaine est capable d'atteindre une dynamique d'environ 120 dB, ce qui correspond à un ratio de puissance entre le son le plus faible et le plus fort que l'on puisse entendre de 10^{12} [Warren, 2008].

De par sa nature, l'audition est donc un sens à longue portée, permettant d'obtenir des informations sur l'environnement même dans les cas d'occultation pour lesquels les autres sens seraient moins efficaces (en forêt par exemple) et ainsi de percevoir et localiser de loin une proie ou un prédateur. Toutes ces propriétés ont lentement transformé l'audition, non seulement en une modalité sensorielle, mais également en un outil de communication particulièrement bien adapté pour prévenir les congénères d'un danger, attirer des partenaires et, plus généralement, transmettre des informations. Les capacités auditives ont probablement joué un rôle clef dans l'apparition de la communication, du langage et même de l'intelligence.

L'apparition d'un récepteur dédié à l'audition (à partir d'une excroissance d'organe vestibulaire) date probablement de la sortie de l'eau des premiers vertébrés il y

a environ 380 millions d'années [Manley and Köppl, 1998, Schnupp and Carr, 2009], ce qui en fait probablement l'organe sensoriel le plus récent.

C'est Helmholtz (1863) qui proposa le premier une théorie du fonctionnement de la cochlée – organe spécialisé de l'oreille interne responsable de la perception sonore – par une décomposition du signal similaire à une analyse de Fourier le long de sa membrane élastique grâce à la résonance de certains éléments (d'abord les piliers de Corti – absents chez les oiseaux et amphibiens – puis, dans une version révisée de sa théorie, la membrane elle-même). Par la suite Békésy (1960) affina cette théorie par de nombreuses observations et expériences sur la cochlée qui lui valurent le prix Nobel.

Cependant, la stricte décomposition fréquentielle des signaux ne constitue pas la seule explication à la perception auditive. En complément de cette théorie « spatiale », il existe également une théorie « temporelle » de la perception auditive. Cette théorie stipule que les fibres nerveuses encodent les sons par des motifs de *spikes* en phases avec le signal [Wever, 1949].

En fait, il apparaît que ces deux théories, prises isolément, ne sont pas capables d'expliquer entièrement la perception auditive. En effet, l'humain est capable de discriminer des différences de sons sous les 1 000 Hz bien plus fines que la décomposition fréquentielle (imparfaite) ne le permet [Nordmark, 1968, Moore, 1974]. Et pour ce qui est de la précision temporelle, les fibres nerveuses ne sont pas capables de transmettre des informations à plus de 500 Hz. Même le principe de la *salve* (*volley principle*) [Wever, 1949] – qui implique qu'un groupe de neurones s'activant en salve est capable de parfaitement transmettre des informations jusqu'à 1 000 Hz – ne fonctionne plus aux alentours des 3 000-5 000 Hz. Il paraît donc nécessaire de prendre simultanément en compte les deux théories pour correctement expliquer l'audition.

Dans ce chapitre, nous décrivons un système auditif artificiel que nous testons sur des tâches de phonotaxie et de localisation de sources avec ségrégation, ainsi qu'en reconnaissance de textures sonores.

3.2 Biologie

3.2.1 Transduction

L'audition chez les mammifères implique une transduction d'une grande complexité impliquant de nombreuses structures mécaniques. Cette transduction commence à partir du système auditif externe jusqu'au système auditif interne dont l'organe majeur est la cochlée.

Système auditif externe Les ondes sonores passent tout d'abord par le pavillon (ou pinna), plus ou moins développé chez les mammifères, lequel possède un squelette cartilagineux le rendant élastique. Chez l'humain, alors que Darwin pensait que les pavillons n'étaient que des vestiges inutiles d'anciennes formes plus élaborées, Rayleigh (1907) avait eu l'intuition que ces pavillons servent à déterminer l'origine

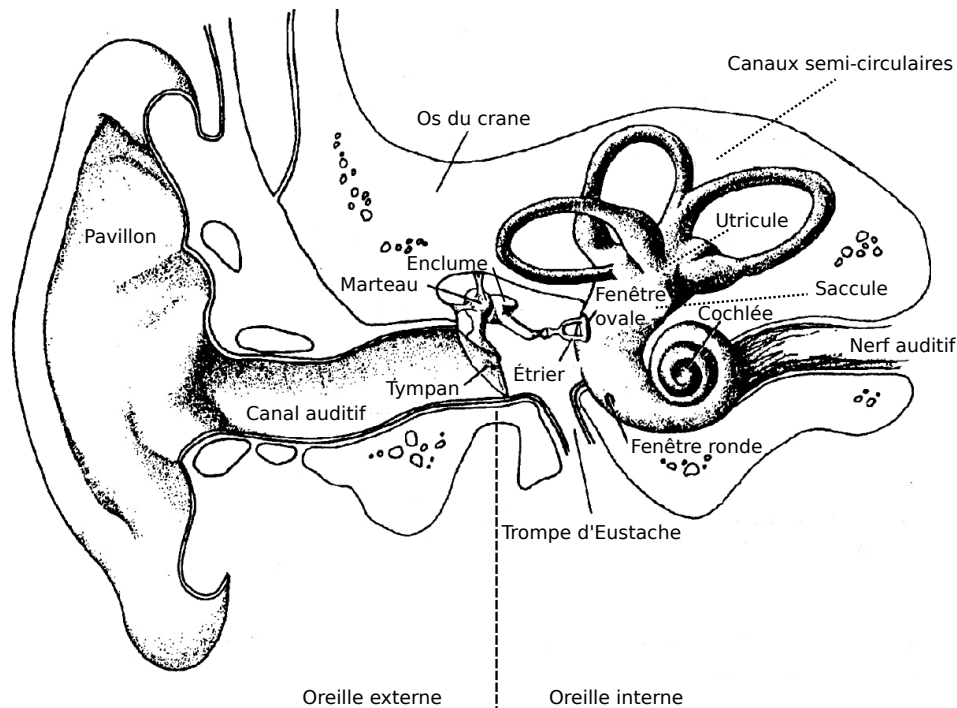


FIGURE 3.1 – Vue globale de l'oreille externe et interne avec ses principaux organes. En pointillés les éléments du système vestibulaire, qui dispose de son propre nerf (le nerf du vestibule) non indiqué. Adapté de [Warren, 2008]

avant/arrière (plan médian) des sources, ce qui fut confirmé plus tard [Butler, 1969, Blauert, 1969].

Le pavillon joue un rôle important dans la localisation des sources sonores par ses propriétés acoustiques complexes le rendant directionnel à certaines fréquences. De plus, ses formes généralement complexes provoquent de petits échos par réflexion. Ces échos, dont les délais dépendent des fréquences, fournissent des informations de localisation monaurales sur l'azimut, l'élévation, ainsi que la position dans le plan médian [Batteau, 1967, Batteau, 1968, Wright et al., 1974].

Une fois passé le pavillon, les ondes sonores sont guidées jusqu'au tympan par le canal auditif possédant une forme de cône acoustique résonnant, amplifiant encore certaines fréquences [Wiener, 1947].

Système auditif interne Les vibrations du tympan sont transmises aux osselets (marteau puis enclume et étrier). Cette transmission est très efficace et permet, par la forme légèrement conique du tympan, un effet de levier de la chaîne ossiculaire et, par le rapport de surface entre le tympan et la fenêtré ovale, de produire une amplification mécanique considérable.

Cette amplification permet aux ondes sonores de changer de milieu, de l'air extérieur au liquide de la cochlée. En effet, sans cette amplification, l'audition serait impossible puisque une onde sonore se propageant dans l'air rebondit en rencontrant

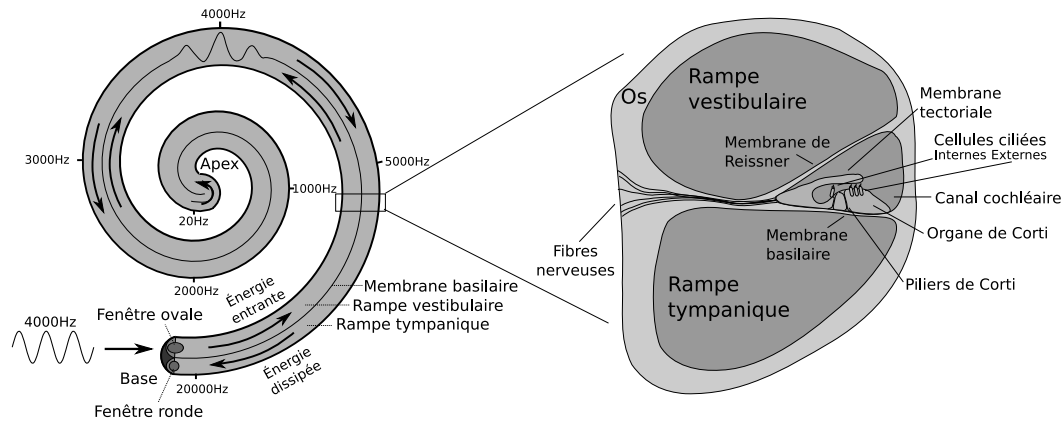


FIGURE 3.2 – À gauche, schéma d'une cochlée dans sa longueur. Les ondes sonores sont transmises en entrée à la fenêtré ovale par l'étrier (non indiqué), parcourent toute la cochlée dans sa longueur à travers la rampe vestibulaire, puis rejoignent la rampe tympanique au niveau de l'apex pour, enfin, se dissiper à travers la fenêtré ronde. La sélectivité fréquentielle le long de la membrane basilaire permet de décomposer spatialement le signal en fréquence. À droite, détail de la cochlée en coupe.

un liquide, ce qui provoque une transmission de seulement environ 0.1 % de son énergie au milieu liquide (30 dB d'atténuation).

Cette chaîne ossiculaire et le tympan forment l'oreille moyenne. On peut noter qu'il existe deux muscles attachés au marteau et à l'étrier qui permettent, en se contractant, de réduire l'intensité des ondes sonores transmises afin de ne pas endommager la cochlée (reflex stapédien). Ces muscles sont généralement comparés à l'iris de l'œil.

L'étrier transmet donc les ondes sonores à la fenêtré ovale à la base de la cochlée (cf. Fig. 3.1). Ces ondes vont ensuite se propager dans le milieu liquide de la périlymphe à travers le conduit de la rampe vestibulaire (ou *scala vestibuli*) jusqu'à l'apex (extrémité de la cochlée), où une petite ouverture (l'hélicotrème) permet une communication avec le conduit tympanique (*scala tympani*). La périlymphe étant un liquide incompressible, les ondes sonores, se propageant à partir de la fenêtré ovale, parcourent tout le chemin de la cochlée pour finir dissipées par la fenêtré ronde (cf. Fig. 3.2).

Le canal cochléaire contenant l'endolymphe est situé entre le canal vestibulaire et le canal tympanique. Il est séparé de ces canaux par la membrane de Reissner et la membrane basilaire respectivement. C'est sur cette membrane basilaire, à l'intérieur du canal cochléaire, que se situe l'organe de Corti sur lequel se trouvent les cellules ciliées responsables de la stimulation du nerf auditif. Les cellules ciliées sont coiffées de petits filaments, les stéréocils. Il existe deux types de cellules ciliées : les cellules internes (une rangée) directement responsables des stimulations du nerf auditif et les cellules externes (trois rangées) dont les stéréocils reposent sur la membrane tectoriale.

Du fait de ses caractéristiques mécaniques, la membrane basilaire – de largeur croissante et de raideur décroissante de la base vers l’apex – forme un filtre très complexe et exhibe un « accordage » aux différentes fréquences sur sa longueur. Ainsi, comme le montre la figure 3.2 (gauche), un signal sinusoïdal de fréquence 4 000 Hz provoquera une résonance, et donc un mouvement plus important de la membrane basilaire, dans une zone particulière accordée à cette fréquence, effectuant ainsi une sorte de décomposition de Fourier. Ces mouvements de la membrane basilaire se transmettent à l’organe de Corti et provoquent des mouvements des stéréocils par rapport à la base des cellules ciliées. Les stéréocils baignent dans l’endolymphe alors que la base des cellules ciliées baigne dans la cortilymphe de l’organe de Corti. Ces deux liquides sont de potentiels électriques différents (du fait d’une différence de concentration en ions K^+). Ainsi les mouvements des stéréocils, en provoquant l’ouverture et la fermeture de canaux ioniques, induisent une circulation des ions à la manière d’une pompe (aidée par la différence de potentiel), ce qui entraîne la stimulation des fibres nerveuses afférentes.

Le fonctionnement précis de la cochlée, bien que de mieux en mieux connu, reste encore relativement discuté. En effet, il apparaît que les cellules ciliées possèdent elles mêmes un accordage fréquentiel précis ne nécessitant pas de mouvement de la membrane basilaire pour provoquer des décharges d’activités [Dancer, 1992]. Cette même membrane n’étant pas assez sensible pour expliquer la détection de sons de très faibles niveaux, il est parfois suggéré que les mouvements de la membrane basilaire ne serviraient qu’à amortir les vibrations trop puissantes afin de dissiper l’énergie en excès et ainsi préserver les fragiles cellules ciliées qui ne se renouvellent pas [Braun, 1994]. De plus, afin de palier au manque de sélectivité fréquentielle de la membrane basilaire, une amplification active est nécessaire à travers les cellules ciliées externes qui ont la capacité de se déformer sous l’effet de stimulations nerveuses [Dallos, 2008].

Enfin, accolées à la cochlée, se trouvent également les structures vestibulaires – saccule et utricule (système maculaire) – responsables de la perception des accélérations linéaires, et les trois canaux semi-circulaires responsables de la perception des vitesses angulaires. Les canaux semi-circulaires se composent de trois canaux de formes presque circulaires arrangés quasi orthogonalement selon les trois plans. La saccule est de forme globulaire et l’utricule de forme plutôt oblongue. Le fonctionnement du système vestibulaire est assez similaire à celui de la cochlée : les mouvements de la tête induisent le déplacement de liquide dans des canaux qui produit en retour le mouvement des stéréocils de cellules ciliées. Toutefois, pour le système maculaire, les cellules ciliées sont lestées de petits cristaux, les otolithes, par un gel visqueux et ce sont donc leurs mouvements d’inertie lors d’accélérations linéaires qui sont perçus.

3.2.2 Chemin neuronal

La plupart des fibres afférentes de la cochlée sont reliées aux cellules ciliées internes avec seulement un faible pourcentage connecté aux cellules externes (chez

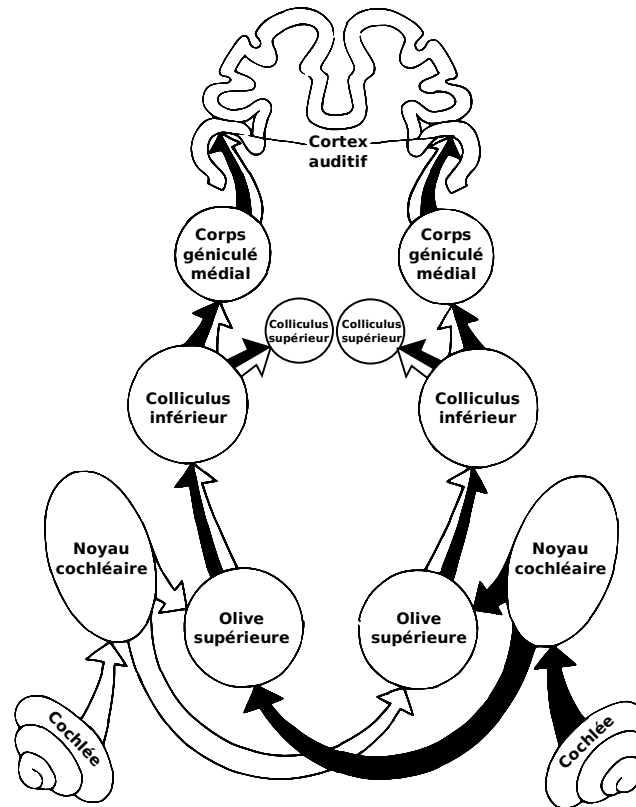


FIGURE 3.3 – Diagramme schématisé des principales voies neuronales de la cochlée jusqu'au cortex auditif. Les voies sont monaurales jusqu'à l'olive supérieure puis binaurales dans les structures suivantes. Adapté de [Yost, 2000]

l'humain environ 90 % des fibres nerveuses sont connectées aux 3 500 cellules ciliées internes et le reste aux 12 000 cellules ciliées externes). Ces fibres afférentes se terminent toutes au niveau du noyau cochléaire à partir duquel d'autres connexions se répartissent en direction de plusieurs structures sous-corticales (cf. Fig. 3.3).

Les fibres du noyau cochléaire se projettent sur les olives supérieures (SO) qui reçoivent donc des projections binaurales et paraissent intégrer les informations de localisation correspondantes [Yin, 2002]. En effet, il semble que la partie médiale du SO soit plutôt sensible à la différence interaurale de temps (ITD) [Joris et al., 1998], alors que la partie latérale réagirait plutôt à la différence interaurale d'intensité (IID) [Joris and Yin, 1995] – deux mesures de localisation de sources sonores dans le plan azimuthal.

Les deux informations de localisation azimuthales, ITD (différence de phase pour les basses fréquences et délai de groupe pour les hautes fréquences) et IID (pour les hautes fréquences) sont donc calculées dans des chemins neuronaux différents. L'information d'élévation est obtenue grâce au filtrage spectral du pavillon (fonction de transfert de la tête, HRTF) [Blauert, 1997]. Toutes ces informations sont ensuite intégrées au niveau du colliculus inférieur (IC) où l'on retrouve une représentation

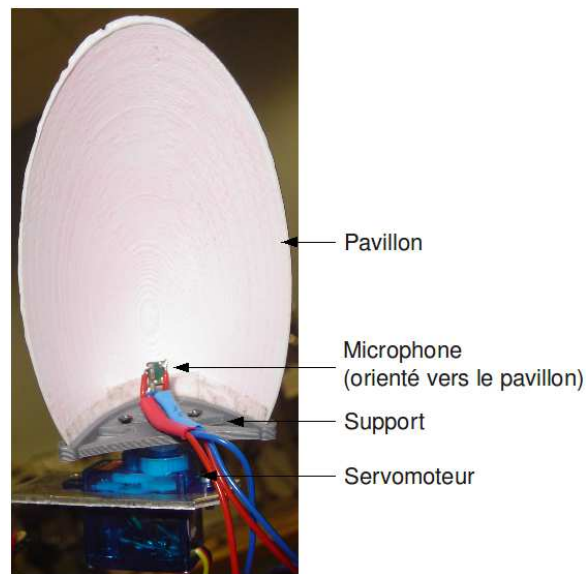


FIGURE 3.4 – Photo de l'ensemble pavillon, microphone.

bi-dimensionnelle de la localisation des sources sonores [Casseday et al., 2002, Zwiers et al., 2004]. Puis ces informations passent par le corps géniculé médial du thalamus pour se projeter au niveau du cortex auditif, où l'on retrouve l'organisation tonotopique de la cochlée [Talavage et al., 2004]. Le colliculus inférieur possède également des connexions (réciproques) fournissant ainsi les informations de localisation de sources sonores au système attentionnel du colliculus supérieur [Zwiers et al., 2004].

Enfin, il existe de nombreuses connexions croisées, entre les lemnisques latéraux, les colliculi, et les cortex auditifs (via le corps calleux) non représentées dans la figure 3.3.

3.3 Système auditif artificiel

3.3.1 Transduction

Le système auditif artificiel que nous avons utilisé dans ce travail a été développé en collaboration avec Mathieu Bernard, dans le cadre de son travail de thèse. Il se compose de deux microphones miniatures fixés à l'intérieur de pavillons (cf. Fig. 3.4) en forme de section d'ellipsoïde, les microphones étant positionnés au niveau des foyers de ces ellipsoïdes et orientés vers l'intérieur. Cette géométrie des pavillons, ainsi que le placement des microphones, provoquent une directionnalité du système auditif dont l'effet non négligeable sera détaillé plus loin. Le système pavillon/microphone est monté sur servomoteur permettant à l'ensemble de tourner dans le plan azimutal.

Après l'acquisition des signaux analogiques des microphones, ceux-ci sont fournis en entrée d'un modèle de cochlée. Le modèle classique utilisé ici est basé sur un banc

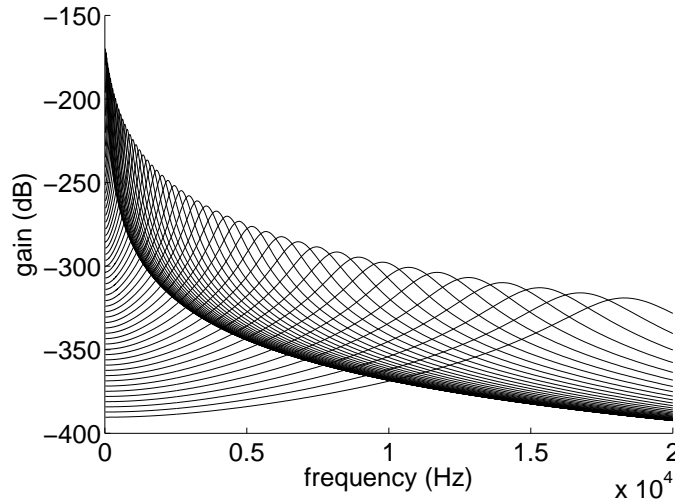


FIGURE 3.5 – Réponses fréquentielles du banc de 50 filtres Γ -tone utilisé pour modéliser la cochlée.

de filtres « Gammatone » (Γ -tone) dont la réponse impulsionnelle est donnée par l'équation (3.1) :

$$g(t) = at^{n-1}e^{-2\pi bt} \cos(2\pi f_c t + \Phi) \quad (3.1)$$

avec a l'amplitude du signal, f_c la fréquence centrale du filtre, b la durée de la réponse impulsionnelle (bande passante) Φ la phase et n l'ordre du filtre (pente et sélectivité). Cette réponse impulsionnelle est donc une sinusoïde dont l'enveloppe $at^{n-1}e^{-2\pi bt}$ est une loi Gamma. La courbe caractéristique de ce filtre est donc approximativement représentée dans le domaine fréquentiel par :

$$G(f) \approx \left[1 + j \frac{f - f_c}{b}\right]^n \quad (3.2)$$

où $G(f)$ est la transformée de Fourier de $g(t)$ et décrit un filtre passe-bande de fréquence centrale f_c .

Les filtres Γ -tone modélisent assez bien la réponse du noyau cochléaire [Johannesma, 1972] et sont classiquement employés pour modéliser les mouvements de la membrane basilaire [Flanagan, 1960, Aertsen et al., 1981]. Le signal du microphone est donc filtré par un banc de N filtres en cascade pour fournir en sortie N (ici avec $N = 50$) canaux cochléaires. La répartition des filtres le long des fréquences est calculée selon la loi proposée dans [Slaney, 1993] avec des paramètres ajustés à l'audition humaine [Glasberg and Moore, 1990] (cf. Fig. 3.5).

3.3.2 Modèle

De manière similaire au modèle décrit en section 2.3.4, une extraction des maxima locaux est effectuée sur chaque canal de la cochlée, compressant ainsi sen-

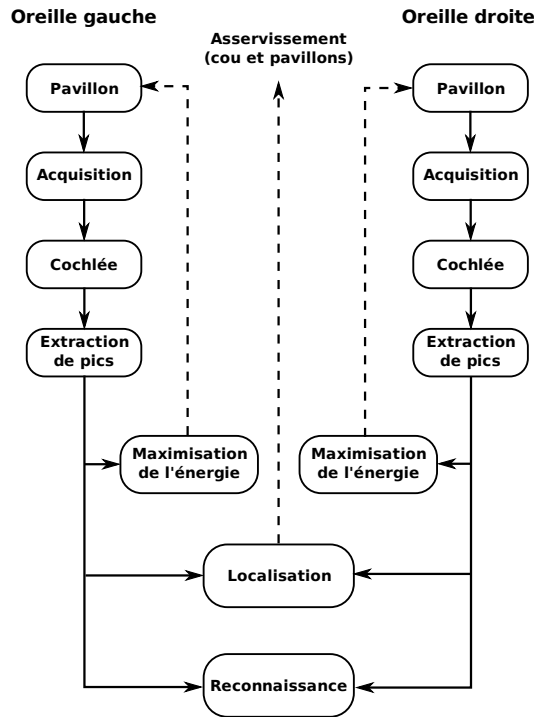


FIGURE 3.6 – Schéma général du modèle auditif. En pointillés les voies de commandes motrices pour la perception active. D’après [Bernard et al., 2010a].

siblement le signal. En effet, il apparaît que les fibres du nerf auditif exhibent des réponses en phase avec le signal (*phase-locked firing*) [Wever, 1949]. De plus, il s’avère que l’intensité du signal est également encodée par un fonctionnement de type *population coding*¹, principe déjà utilisé dans des modèles d’audition [Ghitza, 1994, Kim et al., 1999, Sreenivas and Niederjohn, 1992]. C’est à partir de ces « pics » et des intervalles entre les pics que les informations de localisation et de reconnaissance de sources sonores sont calculées.

3.3.2.1 Localisation

Si l’on suppose un système comprenant deux capteurs auditifs $x_1(t)$ et $x_2(t)$ captant tous les deux une même source sonore $s(t)$ dans un environnement bruité, les signaux perçus seront :

$$x_1(t) = \alpha s(t + \Delta_1 t) + n_1(t) \quad \text{et} \quad x_2(t) = \beta s(t + \Delta_2 t) + n_2(t) \quad (3.3)$$

avec $n_1(t)$ et $n_2(t)$ les bruits perçus respectivement par les capteurs x_1 et x_2 . α et β représente les atténuations et Δ_1 et Δ_2 les délais perçus par x_1 et x_2 .

1. Chaque neurone ne pouvant encoder qu’une petite partie de la plage d’intensité, l’encodage de l’information est le résultat de l’activité de toute une population de neurones plutôt que de l’activité d’un seul neurone.

La différence entre α et β représente ce qu'on appelle la *différence interaurale d'intensité* (IID) et la différence entre Δ_1 et Δ_2 représente la *différence interaurale de temps* (ITD), deux mesures de localisation de sources sonores dans le plan azimutal [de Cheveigné, 1998, Blauert, 1997].

IID Pour un canal cochléaire donné, après l'extraction de pic $P(t)$, on calcule l'énergie E dans une fenêtre de temps T :

$$E = \sum_{t=0}^T P(t)^2 \quad (3.4)$$

La localisation par différence interaurale d'intensité est calculée par :

$$\Delta E = E_{gauche} - E_{droite} \quad (3.5)$$

On obtient ainsi une IID par canal. La somme des IID sur tous les canaux donne une indication d'énergie sonore « globale » perçue par oreille, ce qui permet de localiser grossièrement la source sonore la plus énergétique (c'est-à-dire savoir si elle vient de la gauche ou de la droite) [Bernard et al., 2010a].

Cependant, il apparaît que l'IID seule ne permet pas d'effectuer une localisation fine, puisque les différences d'énergie dépendent largement des conditions environnementales, des caractéristiques des sources, etc. De plus, il n'existe pas de technique simple permettant d'assigner un angle dans le plan azimutal à une différence d'énergie, l'énergie dépendant du signal source et non uniquement de sa position. Seule une information de type « gauche », « droite » ou « en face » est donc disponible. Ainsi, afin d'affiner la précision de la localisation, il est nécessaire d'utiliser l'ITD.

ITD Pour un couple de canaux cochléaires donnés (de même fréquence centrale), après l'extraction de pic $P(t)$, il est possible de calculer le délai d'arrivée entre deux pics Δt de manière similaire au modèle de Jeffress (1948) (cf. Fig. 3.7) en calculant et en accumulant les délais entre les informations provenant de l'oreille gauche et de l'oreille droite. Il faut noter que le modèle proposé par Jeffress s'applique très bien à la chouette, mais n'est plus complètement vrai pour les mammifères [McAlpine and Grothe, 2003, McAlpine, 2005] qui ne possèdent pas les mêmes types de lignes de délai. Cependant nous pouvons considérer ici que le principe de fonctionnement reste qualitativement le même.

L'extraction des pics seule fournit déjà une source pour la détection de coïncidences, bien que leur trop grand nombre rende le calcul d'ITD extrêmement bruité. Il est donc nécessaire d'extraire de ces pics les informations « d'attaques » (*onsets*), c'est-à-dire seulement les commencements des signaux afin de ne travailler que sur les « événements » sonores. Ce principe se rapproche du calcul du délai de groupe (c'est-à-dire du délai de l'enveloppe sonore). Pour ce faire, une règle de seuil de détection adaptatif sur les pics, implémentant de manière qualitative le phénomène de *forward masking* [Meddis and O'Mard, 2005, Bidet-caulet and Bertrand, 2009] est employée.

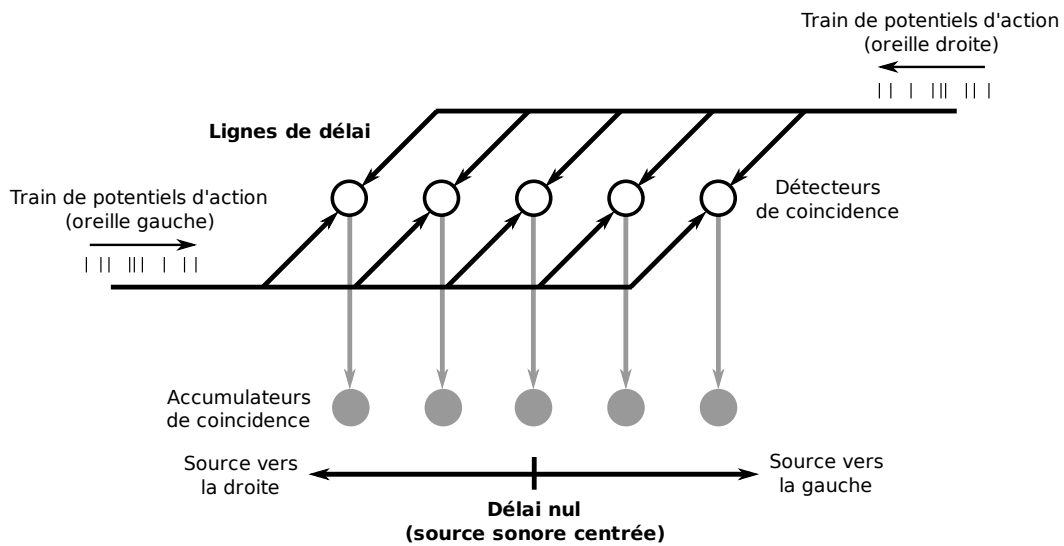


FIGURE 3.7 – Modèle de Jeffress (1948). Les trains de potentiels d'action provenant des systèmes auditifs gauche et droit se croisent sur des lignes de délai entre lesquelles des neurones détectent les coïncidences entre les potentiels d'action. Ces neurones détecteurs sont connectés à des neurones compteurs de coïncidences représentant une sorte d'histogramme des délais. Ce modèle revient à effectuer la corrélation croisée des deux trains de potentiels.

Une fois les délais ITD connus et intégrés dans une fenêtre de temps, connaissant la distance B entre les deux microphones et la vitesse c de propagation du son dans l'air aux conditions normales de température et de pression (environ 340 m/s), il est possible de déterminer l'angle θ de provenance de la source sonore très simplement :

$$\theta = \arcsin\left(\text{ITD} \times \frac{c}{B}\right) \quad (3.6)$$

Cependant on peut remarquer que, pour l'ITD comme pour l'IID, la localisation comporte toujours une ambiguïté avant/arrière.

3.3.2.2 Séparation de sources

Une fois l'ITD calculée pour chaque canal, il est possible de séparer des sources sonores disjointes spatialement et fréquentiellement. La sommation des ITD de tous les canaux permet d'obtenir un histogramme des délais qui, pour N sources, donnera N pics. Il est donc possible de séparer les sources par leurs délais, et d'assigner à chacune les canaux correspondants. On obtient alors une séparation spatiale et fréquentielle (cf. Fig. 3.8).

Cependant ce procédé ne peut fonctionner que si les sources en question sont clairement disjointes du point de vue de leur contenu spectral. En effet, l'ITD étant calculée par canal, si les sources possèdent des fréquences différentes, elles seront décomposées par la cochlée sur des canaux différents et il sera possible d'assigner

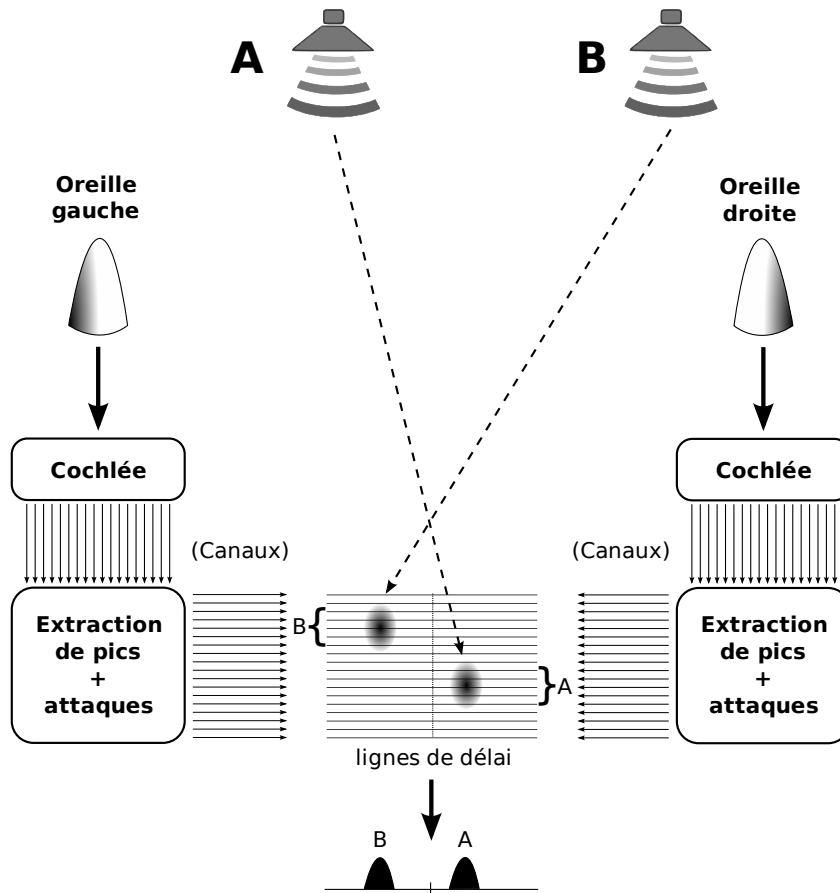


FIGURE 3.8 – Schéma du modèle de ségrégation de sources. Deux sources A et B fréquentiellement séparées provoquent deux « blocs » de délais différents sur un sous-ensemble des canaux, dont la projection peut être séparée. On peut donc ensuite assigner à chacun des blocs les canaux correspondants.

des valeurs d'ITD différentes par canal. Mais, si les sources possèdent des fréquences identiques, elles se retrouveront mélangées sur les mêmes canaux et donc beaucoup plus difficiles à séparer.

De plus, afin de remédier aux ambiguïtés pouvant apparaître dans le calcul d'ITD (dans les hautes fréquences le calcul peut donner plusieurs ITD équiprobables), ITD et IID sont combinées de manière similaire à celle décrite dans [Liu et al., 2008].

3.3.2.3 Reconnaissance

La reconnaissance de sources sonores s'effectue selon la même méthode que pour les textures tactiles en section 2.4. En sortie de chaque canal, les pics et les périodes inter-pics sont extraites, ce qui permet de calculer la valeur caractéristique IMP. On obtient alors un vecteur d'IMP de taille $2 \times N$ avec N le nombre de canaux par cochlée, ce vecteur représentant la signature de la source qu'il est possible d'ap-

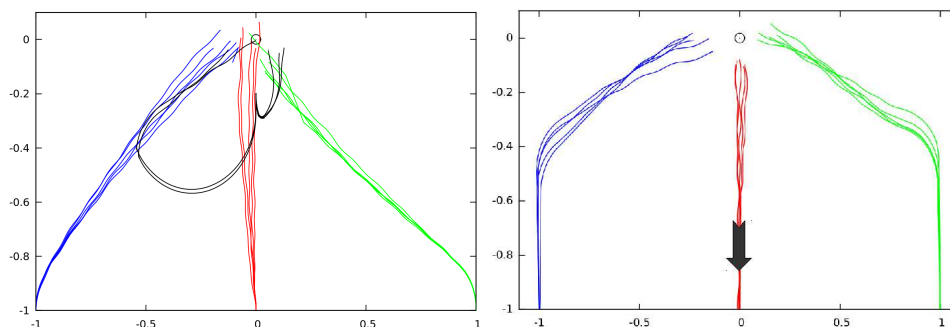


FIGURE 3.9 – Trajectoires obtenues selon différents points de départ (bleu à gauche, rouge en face, vert à droite et noir de dos) avec une source en position $(0, 0)$. À gauche avec les pavillons et à droite sans les pavillons. Tiré de [Bernard et al., 2010a].

prendre. Il y a donc ici une similarité directe entre les traitements des sens auditif et tactile, les différents canaux cochléaires représentant les homologues des vibrisses. Ainsi, il est possible de faire le lien entre le système vibrissal du rat et la cochlée qui possèdent tous les deux des propriétés de résonance organisées spatialement selon un gradient aux niveaux de la transduction et de la représentation corticale [Neimark et al., 2003, Andermann et al., 2004]. De plus, il apparaît qu’il existe des interactions entre audition et toucher au niveau psychophysique et biologique [Foxe, 2009]. Par exemple, Yau et al. (2009a) ont montré que l’audition avait une influence sur la perception tactile dans des tâches de reconnaissance de textures chez l’humain. Il a également été avancé l’hypothèse selon laquelle le traitement spectral pour les sens tactile et auditif pourrait être effectué par la même structure, dans la ceinture caudo-médiale du cortex auditif [Yau et al., 2009a].

Comme pour le sens tactile, cette méthode est plutôt adaptée pour des « textures » sonores, c’est-à-dire des motifs relativement homogènes dans le temps, comme le son produit par des maracas ou un trousseau de clefs, à l’opposé de mots prononcés par exemple.

3.4 Expériences

3.4.1 Localisation

3.4.1.1 IID seule

Des expériences de phonotaxie ont été menées en utilisant uniquement l’IID avec, comme source, un bruit blanc de volume constant. Comme vu précédemment, l’IID ne permet de fournir qu’une information spatiale grossière (gauche, droite, devant/derrière), ce qui implique d’utiliser une perception active.

Ainsi chaque pavillon est contrôlé indépendamment par une boucle sensori-motrice cherchant à maximiser l’énergie sonore perçue. Ce comportement permet,

grâce à la sélectivité des pavillons, de maximiser le ratio signal sur bruit (SNR) et ainsi de mieux percevoir la source.

La direction de la tête du robot est contrôlée par une autre boucle sensori-motrice, cherchant à minimiser l'IID, c'est à dire à centrer la source et à s'orienter vers elle. À chaque instant un léger comportement d'exploration, où la tête effectue de légers mouvements de gauche à droite, permet de constamment affiner la recherche de la source de manière incrémentale. Pour plus de détails, voir [Bernard et al., 2010a].

Résultats On constate en figure 3.9 que le robot est capable de s'orienter sans problème vers la source avec différents points de départ en effectuant des trajectoires quasi-directes. De plus la courbe noire (Fig. 3.9, gauche) représente la trajectoire du robot lorsqu'il est placé de dos par rapport à la source. On constate que le robot est capable de se retourner pour se diriger vers la source, résolvant ainsi le problème de l'ambiguïté avant/arrière.

En revanche, il apparaît que, sans les pavillons, les performances sont significativement moins bonnes (Fig. 3.9, droite). Les trajectoires sont beaucoup moins directes, le robot ne détecte une différence d'ITD qu'à une distance plus faible de la source. De plus, sans l'utilisation des pavillons, l'ambiguïté avant/arrière n'est plus levée : le robot placé de dos par rapport à la source ne se retourne pas et se dirige dans le sens opposé.

3.4.1.2 ITD

Des expériences de localisation et de séparation de sources en utilisant l'ITD ont été menées avec des sources constituées par des enceintes acoustiques. Les enceintes sont séparées de 1,10 m et placées sur une ligne parallèle à l'axe entre les oreilles, à une distance de 1 m (soit à des angles de $\arctan(\frac{1}{2}) \approx 28.8^\circ$ à gauche et à droite). Ici la localisation est testée sur le son du chant d'un canari, son choisi pour sa bonne « compacité » spectrale (ses composantes spectrales sont très regroupées dans les aigus).

Résultats Les délais d'arrivée entre les sources sont exprimés en unités de pas de temps d'échantillonnage. La précision du calcul de l'ITD dépend donc – pour une célérité du son donnée – de la distance inter-aurale ainsi que de la fréquence d'échantillonnage :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{D}{FS} \times \frac{c}{B}\right) \quad (3.7)$$

comme dans l'équation 3.6 mais avec D le délai en pas de temps et FS la fréquence d'échantillonnage. Il existe donc un délai maximum correspondant à un angle de 90° pour une distance B donnée. Le nombre de délais détectables est de $2 \times N + 1$ avec $N = FS \times B/c$. Ici la distance inter-aurale B est de 14 cm avec

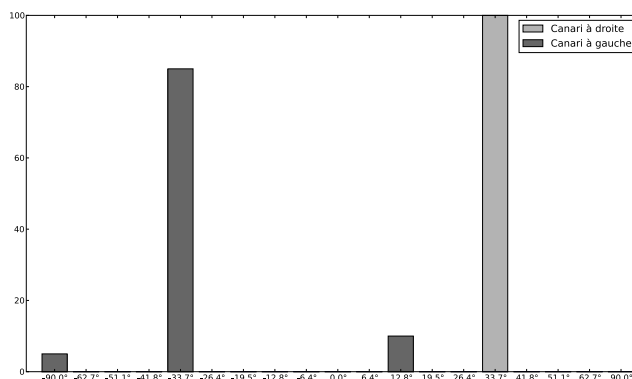


FIGURE 3.10 – Histogramme de la localisation obtenue pour la source sonore placée à $\pm 28.8^\circ$ pendant 15 s.

une fréquence d'échantillonnage FS de 22 050 Hz ce qui donne 19 valeurs de délais possibles, la précision maximale de la localisation dans notre cas.

La figure 3.10 montre l'histogramme de la direction détectée pour la source jouée pendant 15 secondes. Les délais les plus détectés sont de respectivement $+5$ et -5 (ce qui correspond à des angles de $\pm 33.7^\circ$) pour des sources placées à 28.8° et -28.8° , soit une erreur 4.9° .

3.4.2 Séparation de sources

Ici, en plus du chant de canari, nous ajoutons un aboiement de chien (dont le spectre est regroupé dans les graves). Les deux sources sont placées à 28.8° à gauche (chien) et à droite (canari) et jouées en même temps.

Résultats La figure 3.11 montre les canaux activés pour le canari seul (gauche), ainsi que pour le canari et le chien ensemble (droite). On constate que la séparation spatiale et fréquentielle permet de distinguer les deux sources pour une reconnaissance ultérieure.

3.4.3 Reconnaissance

Des expériences de reconnaissance de sources sonores ont également été effectuées en simulation avec des sources composées de bruits comprenant 3 pics fréquentiels de manière similaire aux signaux tactiles produits par des papiers de verre [Neimark et al., 2003]. Différentes caractéristiques ont été testées (Af : IMP, A seule et f seule).

Bernard et al. (2010b) comparent également les capacités de reconnaissance de textures entre l'auditif et le tactile en simulant une matrice de vibrisses par la méthode des Γ -tone.

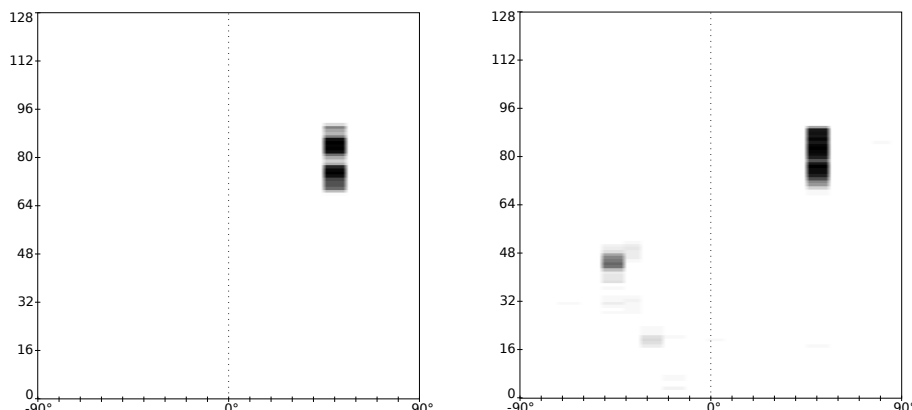


FIGURE 3.11 – Représentation délais-canaux (cf. Fig 3.8) pour un chant de canari et un aboiement de chien. A gauche, canari seul placé à $+28.8^\circ$. A droite, idem avec aboiement placé à -28.8° .

Résultats La figure 3.12 résume les performances de classification obtenues avec la caractéristique IMP en fonction du nombre de canaux utilisés pour simuler la cochlée. On constate une augmentation des performances qui stagnent ensuite à plus de 90% vers 25 canaux. Ce résultat est très similaire à celui obtenu en reconnaissance de texture tactiles (figure 2.16). Pour plus de détails voir [Bernard et al., 2010b].

3.5 Discussion

Si l’audition repose sur un mode de transduction très complexe, il est possible de reproduire relativement simplement certaines caractéristiques de ce processus. Le modèle de cochlée utilisé ici, basé sur un banc de filtre Γ -tone, est une approximation de la réponse de la membrane basilaire à des stimulations sonores. Ce modèle ne reproduit pas les phénomènes de filtrage et d’amplification actifs de la cochlée, mais il semble qu’il constitue quand même un bon point de départ pour un système auditif artificiel et il est classiquement utilisé comme tel.

Influence des pavillons Le système présenté utilise également des pavillons de forme relativement simple – surtout si on les compare aux pavillons des animaux – mais qui suffisent pour améliorer la qualité de la localisation basée sur l’IID. De plus, ils permettent de lever l’ambiguïté avant/arrière, ce qui n’est habituellement pas un problème simple (nécessitant l’utilisation de l’HRTF). L’ajout de ces pavillons offre une solution implicite à ce problème qui n’implique pas de calculer le déphasage dans les échos induits par les pavillons. Ici les pavillons exhibent juste une légère sélectivité directionnelle qui est utilisée de manière active, ce qui produit incrémentalement une localisation de source. L’utilisation combinée de l’IID et de l’ITD a montré son

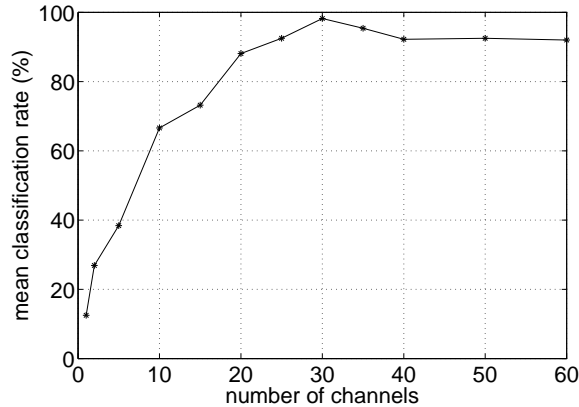


FIGURE 3.12 – Évolution des performances de classification moyenne en fonction du nombre de canaux cochléaires. Tiré de [Bernard et al., 2010b].

efficacité dans la localisation des sources sonores sur l’axe azimutal, mais ce système ne permet pas l’estimation de l’élévation, qui devra faire l’objet de travaux futurs.

Séparation de sources La localisation fournit une bonne indication pour la séparation de sources. En effet, des sons provenant de lieux différents sont probablement originaires de sources différentes et inversement. Lorsque des sources sont séparées spatialement, il est ensuite possible de les séparer également au niveau fréquentiel et donc de les reconnaître indépendamment, à condition que leurs contenus spectraux soient séparables par la cochlée. Il s’avèrera probablement possible, lors de futurs travaux, d’ajouter au modèle de cochlée une influence *top-down*, c’est-à-dire une inhibition et une amplification des canaux en fonction de la source concernée. Par l’intermédiaire des cellules ciliées externes [Dallos, 2008], on pourrait ainsi filtrer les sons non pertinents – le *cocktail party effect* [Bronkhorst, 2000] – ajoutant un aspect actif supplémentaire à l’audition.

Reconnaissance Enfin, comme nous l’avons vu, la reconnaissance de « textures » sonores (c’est-à-dire des motifs stables dans le temps) permet, dans une certaine mesure, d’identifier les sources. Il est possible de reconnaître si un son est intéressant ou non et ainsi de déclencher un comportement adéquat. Cette aptitude à reconnaître certains sons, combinée à la séparation de sources, rend possible l’identification de plusieurs sons simultanément.

Cependant cette capacité reste limitée. En effet, elle repose grandement sur la stabilité temporelle de la « texture ». Un son tel qu’un mot prononcé se distingue plutôt par l’enchaînement rapide de petites unités sonores (les phonèmes) ainsi que par leurs intonations. Même s’il est possible d’ajuster la constante de temps pour l’intégration temporelle, il est probable que notre système ne soit pas adapté à cette tâche. En plus de pouvoir extraire des informations sur les textures sonores, il semble donc également important de pouvoir extraire des informations sur les « formes » sonores

(les sons structurés dans le temps). Ces questions doivent être investiguées dans des travaux ultérieurs dans le cadre de la thèse de Mathieu Bernard.

Systeme visuel

Sommaire

4.1	Introduction	57
4.2	Biologie	58
4.2.1	Circuits de la vision	58
4.2.2	Colliculus supérieur	62
4.2.3	Ganglions de la base	63
4.2.4	Circuit saccadique	65
4.3	Système visuel artificiel	67
4.4	Génération de saccades	73
4.4.1	Description du modèle	73
4.5	Expériences	80
4.5.1	Dispositif expérimental	80
4.6	Résultats	81
4.6.1	Comportements basiques	81
4.6.2	Comportements complexes	82
4.7	Discussion	84

4.1 Introduction

La vision est probablement la modalité sensorielle la plus étudiée et la plus largement utilisée en robotique. Ceci tient au fait qu'elle constitue le sens dominant chez l'humain, qu'elle possède une richesse indéniable et qu'elle est extrêmement sensible (les récepteurs de l'œil humain sont capables de détecter 7-8 photons). Cependant le problème de la compréhension du fonctionnement du système visuel reste d'actualité.

Après les découvertes de Kuffler (1953) sur le fonctionnement centre-périphérie (*center-surround*) des cellules ganglionnaires de la rétine, nous savons que l'œil ne transmet pas « fidèlement » au cerveau les images qui s'y projettent à la manière d'une caméra, mais qu'il effectue préalablement un traitement, une compression de l'information. Par la suite, les travaux fondamentaux de Hubel et Wiesel (1959), qui leur valurent le prix Nobel, ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la perception visuelle en décrivant comment l'aire visuelle primaire (V1) dans le cortex occipital est organisée et comment les neurones s'y trouvant encodent l'information. La découverte de ce traitement effectué par les cellules « simples »,

« complexes », « colonnes » et « hyper-colonnes » nous a fait prendre conscience que la perception que nous avons de notre environnement est, en fait, issue d'une sorte de reconstruction effectuée par notre cerveau à partir d'un large ensemble de caractéristiques « simples » comme les angles des bords, les directions de déplacement de ces bords, etc. Notre vision est donc fondamentalement imparfaite, dans la mesure où elle n'est pas la stricte projection optique de l'environnement, intuition qu'avait déjà von Helmholtz (1867) lorsqu'il énumérait les nombreuses imperfections optiques de l'œil tout en soulignant que, pour autant, cet organe était adapté à nos besoins : *on ne coupe pas du bois de chauffage avec un rasoir*.

Une des questions importantes ayant trait à la vision est celle du fonctionnement de l'attention. En effet, il semble que le cerveau soit incapable de se focaliser sur tous les détails de l'environnement simultanément [Posner, 1980]. De plus, chez les primates anthropoïdes comme les humains, ainsi que chez certains poissons, reptiles et oiseaux, la vision est dite « fovéale », c'est-à-dire que toute l'acuité se concentre dans une minuscule zone au centre du champ visuel, la fovéa (couvrant environ 2°), alors que la sensibilité (à la lumière, aux mouvements) est, elle, répartie sur le reste de la rétine. Ainsi nos yeux « scannent » constamment l'environnement en « sautant » d'un objet à un autre, d'un détail à un autre, par des mouvements très rapides – appelés *saccades* – pouvant atteindre une vitesse de $1\,000^\circ/s$. On observe ce comportement également chez des animaux ne possédant pas de fovéa, comme le rat [Fuller, 1985], le lapin [Collewijn, 1977] et le chat [Evinger and Fuchs, 1978]. Ces saccades oculaires sont un comportement essentiel à une bonne perception et la compréhension de ce phénomène fait l'objet de travaux depuis des décennies. On sait aujourd'hui que la zone principalement responsable de ce processus saccadique est le colliculus supérieur dont une stimulation déclenche une saccade. Cependant, le colliculus supérieur seul ne permet pas d'expliquer le choix d'une cible, en particulier lorsque plusieurs cibles sont présentes dans le champ visuel. Ce processus de décision semble être effectué par une autre structure – les ganglions de la base – qui est en interaction avec le colliculus supérieur.

Dans le chapitre suivant, nous décrivons un modèle du circuit saccadique incluant le colliculus supérieur, ainsi que les ganglions de la base en interaction par l'intermédiaire de différentes boucles. Ce modèle est ensuite testé sur une plateforme robotique dans plusieurs tâches d'apprentissage de saccades impliquant des informations spatiales et non-spatiales.

4.2 Biologie

4.2.1 Circuits de la vision

La transduction de la lumière en impulsions neuronales est une fonction largement répandue dans le vivant. On estime que 96 % des espèces animales possèdent un système optique complexe [Land and Fernald, 1992]. Cette transduction peut varier de la simple détection de lumière chez certains organismes unicellulaires, jusqu'à la formation d'une image précise à travers une lentille. Chez les mammifères,

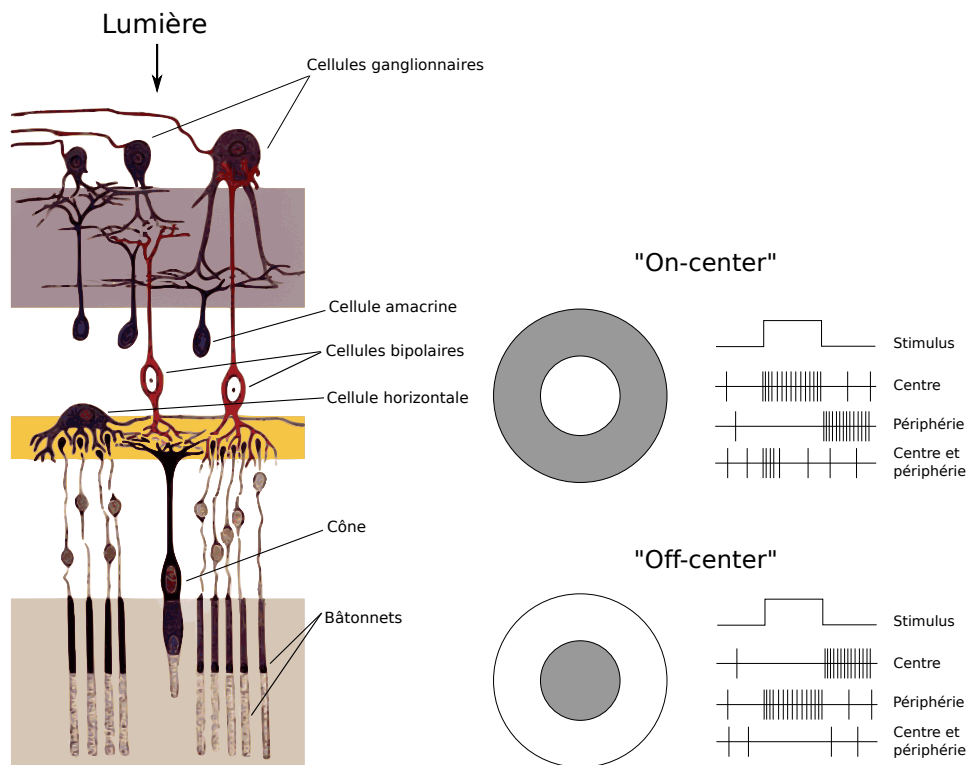


FIGURE 4.1 – Structure de la rétine (à gauche) d'après [Ramon Y Cajal, 1900]. Champs récepteurs *center-surround* (droite), en grisé les zones inhibitrices.

le système optique de l'œil se compose principalement de l'iris (jouant le rôle de diaphragme permettant de contrôler la quantité de lumière entrant dans l'œil), le cristallin (jouant le rôle de lentille permettant de focaliser l'image) et de la rétine (le capteur de lumière). La rétine se compose d'une multitude de cellules photosensibles composées de deux types, les cônes (permettant la vision diurne photopique et la perception des couleurs) et les bâtonnets (permettant la vision scotopique en noir et blanc). Chez l'humain ces récepteurs sont au nombre d'environ 5 millions pour les cônes et 120 millions pour les bâtonnets, quasiment tous concentrés dans une petite région centrale, la macula (contenant elle même la fovéa, zone encore plus petite constituée exclusivement de cônes).

Les photorécepteurs sont ensuite directement connectés aux cellules bipolaires, qui prennent en entrée soit un ou plusieurs cônes, soit un ou plusieurs bâtonnets. Puis les cellules bipolaires transmettent l'information aux cellules ganglionnaires qui effectuent une première étape de traitement. En effet les cellules ganglionnaires se caractérisent par des champs récepteurs de type centre-périphérie (*center-surround*), ce qui provoque une détection de contraste. Ce champ récepteur présente la forme de deux disques concentriques (en fait plus précisément de type « chapeau mexicain ») impliquant entre cinq et plusieurs milliers de récepteurs dont la périphérie de type « OFF » va inhiber, lorsqu'elle est activée, le centre de type « ON » et inver-

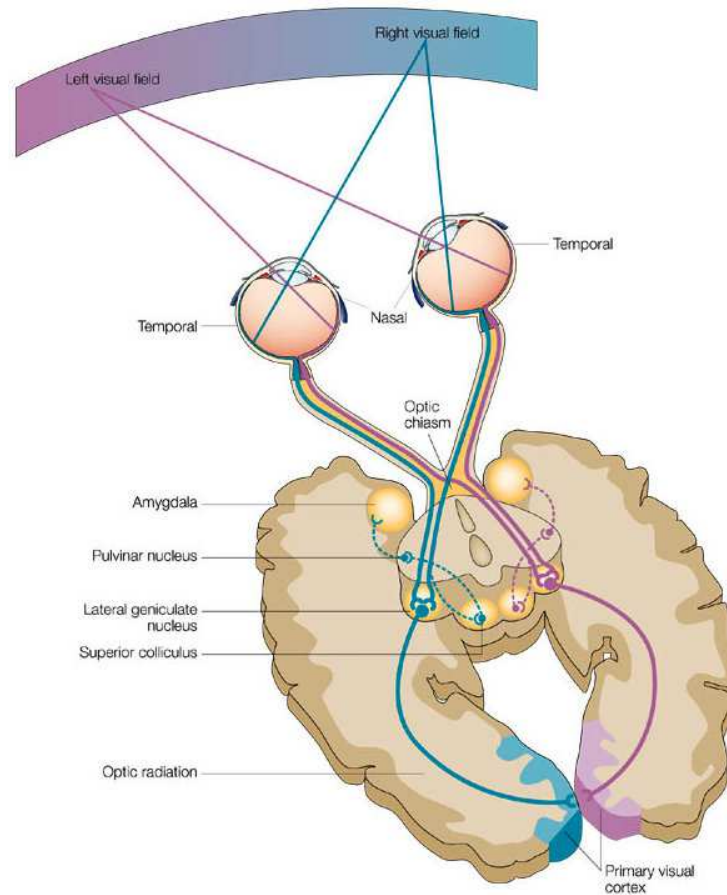


FIGURE 4.2 – Chemin neuronal de la vision, de la rétine jusqu'au cortex visuel primaire. Adapté de [Hannula et al., 2005]

sement pour les cellules ganglionnaires possédant une périphérie « ON » et un centre « OFF » (cf. fig. 4.1). Cette fonction s'effectue à l'aide des connexions latérales fournies par les cellules horizontales reliant les récepteurs et par les cellules amacrines reliant les cellules ganglionnaires. De plus les cellules ganglionnaires sont environ 100 fois moins nombreuses que les photorécepteurs, ce qui entraîne une compression de l'information transmise dans le nerf optique. Chez l'humain on estime que le nerf optique transmet environ 875 000 bits/s au cerveau [Koch et al., 2006], ce qui est finalement très peu.

Il existe deux larges catégories de cellules ganglionnaires, classées selon leurs dynamiques : les cellules « toniques » et les cellules « phasiques » [Gouras, 1968]. Les cellules toniques conservent une activité durant toute la période pendant laquelle elles sont stimulées. De plus, elles répondent spécifiquement aux trois types de cônes et donc transmettent l'information de couleur [De Monasterio and Gouras, 1975]. On les appelle également cellules P, ou cellules parvocellulaires, car leurs fibres se terminent dans la couche parvocellulaire du noyau latéral géniculé du thalamus (c'est la voie parvocellulaire). Les cellules phasiques s'adaptent aux stimulations et

répondent donc plutôt à la dérivée de la stimulation car elles ne s'activent qu'au début et à la fin d'une stimulation. Contrairement aux cellules toniques, les cellules phasiques ne répondent pas spécifiquement aux couleurs mais à la combinaison des couleurs, la luminance [De Monasterio and Gouras, 1975].

Les informations transmises par le nerf optique passent ensuite par le chiasma optique, où les fibres nerveuses de chaque demi-champ visuel des deux yeux sont séparées et croisées afin de regrouper les informations concernant le demi champ gauche et le demi champ droit : c'est la *décussation* (cf. fig. 4.2).

Puis les informations du demi-champ visuel sont transmises au noyau latéral géniculé du thalamus qui se projette ensuite sur le cortex visuel primaire V1 (ou cortex strié) dans les lobes occipitaux, où des traitements de plus haut niveau sont effectués.

Au niveau de V1, on retrouve une organisation neuronale hiérarchique particulière en différentes couches et colonnes. Cette organisation, découverte par Hubel et Wiesel (1959), est aujourd'hui relativement connue mais n'est pas encore entièrement comprise et se trouve toujours activement investiguée. Elle implique, par exemple, des cellules « simples » dont les champs récepteurs sont allongés avec des inhibitions provenant du voisinage et qui répondent donc préférentiellement à une barre lumineuse d'une orientation donnée, dans une zone précise du champ visuel [Hubel and Wiesel, 1959]. Elle implique également des cellules « complexes », prenant en entrée plusieurs cellules simples, répondant ainsi préférentiellement à une orientation – quelle que soit sa position dans le champ visuel [Hubel and Wiesel, 1962]. Ces cellules complexes peuvent également répondre préférentiellement à un mouvement dans une direction donnée ou à une vitesse donnée [Priebe et al., 2006]. Enfin, les cellules « hyper-complexes » répondent à la taille des bords : plus ils sont petits, plus ces cellules s'activent [Hubel and Wiesel, 1977], permettant ainsi de détecter des coins. D'une manière générale on considère que l'aire V1 effectue une extraction de caractéristiques semblable à des combinaisons de filtres de Gabor extrayant les fréquences spatio-temporelles (orientation, mouvement, direction, vitesse). La perception de la couleur dans V1 est effectuée par des cellules répondant au ratio local de rouge/vert ou bleu/jaune [Conway, 2001]. Cette particularité serait responsable de notre capacité à percevoir les couleurs de manière stable indépendamment de la luminosité. Tous ces neurones se retrouvent ordonnés dans des structures appelées hypercolonnes [Hubel and Wiesel, 1977] comprenant des colonnes de dominances oculaires (répondant aux stimulations provenant d'un seul œil), des colonnes d'orientations (répondant à une orientation donnée) et des blobs (répondant aux couleurs).

Après le cortex visuel primaire V1, le chemin sensoriel se sépare, ici encore, selon deux voies : la voie ventrale (voie *what* traitant principalement des informations de couleurs et de formes) et la voie dorsale (voie *where* traitant principalement des informations de positions et mouvements). La voie ventrale se compose principalement de l'aire V2 puis V4 et enfin IT (cortex inférieur temporal) où l'on retrouve des cellules sensibles aux combinaisons de formes et couleurs et impliquées dans la reconnaissance de forme [Gross et al., 1972]. La voie dorsale se compose principa-

lement de l'aire V5/MT (cortex medio-temporal) et PG (cortex pariétal), où l'on retrouve des cellules sensibles aux directions et vitesses des objets en mouvement.

Enfin, il existe également une voie allant directement du chiasma optique vers le colliculus supérieur. Transmettant des informations de position, taille et mouvement [Girman and Lund, 2007], cette voie est très probablement responsable de la vision aveugle (*blindsight*) [Covey and Stoerig, 1991] – phénomène de vision inconsciente résiduelle qui permet aux personnes dont le cortex visuel est lésé de conserver une vision réflexe. Cette projection reste assez faible chez l'humain (environ 10 % des fibres rétiniennes [Covey and Stoerig, 1991]) mais très importante par exemple chez le chat (plus de 50 % [Wässle and Illing, 1980]), le rat (~ 90 % [Linden and Perry, 1983]) et le lapin (~ 100 % [Vaney et al., 1981]). La figure 4.2 détaille ce trajet neuronal. Notons qu'il existe encore d'autres voies, comme la voie photique, allant des cellules ganglionnaires jusqu'aux noyaux suprachiasmatiques – cette voie participe à la régulation du cycle circadien et est présente chez tous les vertébrés – et comme le système optique accessoire impliqué dans les mouvements de stabilisation de l'image sur la rétine, allant de certaines cellules ganglionnaires sensibles aux mouvements vers plusieurs petits noyaux cellulaires.

4.2.2 Colliculus supérieur

Le colliculus supérieur (SC) – ou tectum optique chez les non-mammifères – forme une région du mésencéphale (tronc cérébral), centre sensoriel réflexe connu pour être impliqué dans les comportements oculomoteurs, mais également dans l'intégration multi-sensorielle (vision, audition, tactile) [Stein and Meredith, 1993].

En effet les couches superficielles du SC reçoivent des connexions provenant directement de la rétine [Hoffmann, 1972, Beckstead and Frankfurter, 1983], d'autres couches reçoivent des informations auditives et somatosensorielles et l'on retrouve dans des couches intermédiaires des réponses multi-sensorielles [Wallace et al., 1993]. Les couches profondes, elles, sont plutôt motrices et sont capables de déclencher des mouvements d'orientation. Le SC reçoit également des connexions provenant de différentes zones du cortex [Wallace et al., 1993].

Il apparaît que chacune de ces couches est organisée en une carte topographique représentant le champ sensoriel dans un repère rétinocentré [Robinson, 1972, Klier et al., 2001], probablement dû à la forte dominance de la vision sur les autres sens. Ainsi, une stimulation des couches motrices provoque une saccade oculaire en direction de la zone stimulée. Toutefois, le SC ne se limite pas à la génération de mouvements oculaires, puisqu'il est également impliqué dans les mouvements d'orientation de la tête [Stryker and Schiller, 1975, Guillaume and Pélisson, 2001, Pélisson et al., 2001], du corps entier (chez le rat par exemple) [Cooper et al., 1998, Felsen and Mainen, 2008] ainsi que dans des mouvements d'atteinte de cible par le bras [Lünenburger et al., 2001, Stuphorn et al., 2000, Crawford et al., 2004] et même, plus généralement, dans la direction de l'attention chez le primate [Kustov and Robinson, 1996, Krauzlis, 2007]. Chez les non-mammifères, cette structure (tectum) est également très présente, ce qui témoigne de son apparition très ancienne dans l'évolution.

En effet, si le SC représente une infime partie du cerveau des primates, largement dominée par le cortex apparu « récemment », chez les non mammifères – comme les poissons, les oiseaux, reptiles et batraciens – cette structure est l’une des plus développées.

Il existe dans les différentes couches du SC plusieurs types de neurones classés selon leurs caractéristiques de décharge. Il existe tout d’abord des neurones dont l’activité est reliée aux entrées visuelles. Ces « neurones visuels » se déclinent eux-mêmes en plusieurs familles selon leurs types d’activités. On retrouve des neurones d’activités « phasiques », déchargeant lorsqu’un objet apparaît, disparaît ou les deux ; des neurones d’activités « toniques », déchargeant durant toute la présence de l’objet ou même encore après (neurones quasi-visuels) ; et, enfin, des combinaisons de toutes ces activités (pour plus de détails voir [Girman and Lund, 2007]).

Il existe également des neurones dont l’activité est reliée aux sorties motrices des saccades. On peut à nouveau classer grossièrement ces neurones en deux catégories selon leur motif de décharge. Il y a les neurones à bouffée de décharge (*burst neuron*), dont les brèves activités de décharges sont synchronisées avec le départ d’une saccade. Les neurones à rampe d’activité (*build-up neurons*) sont, eux, caractérisés par une croissance d’activité pendant une courte période précédant une saccade. Il existe également des neurones dont l’activité ressemble à une combinaison de *burst* et de *build-up*. Enfin il existe des neurones de « fixation » dont l’activité est inversée par rapport aux précédents, c’est-à-dire qu’ils s’activent pendant la fixation du regard sur un objet et se désactivent pendant une saccade [Munoz and Wurtz, 1995].

Dans la mesure où toute cette description du fonctionnement du SC centrée sur la vision demeure valable pour les autres sens, on peut considérer le SC comme une structure encodant les cibles sensorielles dans un espace moteur rétinocentré [Stein and Meredith, 1993].

4.2.3 Ganglions de la base

Les ganglions de la base (BG) forment un groupe de noyaux du prosencéphale (cerveau antérieur) connectés notamment au thalamus (TH), au cortex (Ctx) [Alexander et al., 1986] et au colliculus supérieur [McHaffie et al., 2005]. Les BG sont une des structures fondamentales du cerveau, connue pour être impliquée dans de nombreuses fonctions comme la sélection de l’action, le contrôle moteur et l’apprentissage par renforcement [Mink, 1996, Redgrave et al., 1999, Schultz et al., 1997]. Chez l’humain, les déficiences des BG sont impliquées dans un grand nombre de maladies comme Parkinson, Huntington, le syndrome de Tourette, la schizophrénie, les déficits d’attention, et certaines addictions [Albin et al., 1989].

Les BG se composent du striatum et du noyau sub-thalamique (STN) en entrée, du pallidum latéral (GPe) et de la substance noire compacte (SNc) avec l’aire ventrale tegmentale (VTA) en structures internes, du pallidum médial (GPi) et de la substance noire réticulée (SNr) en sortie. Les connexions entre ces noyaux sont relativement complexes.

Le striatum projette des connexions inhibitrices sur GPi/SNr (neurones dopa-

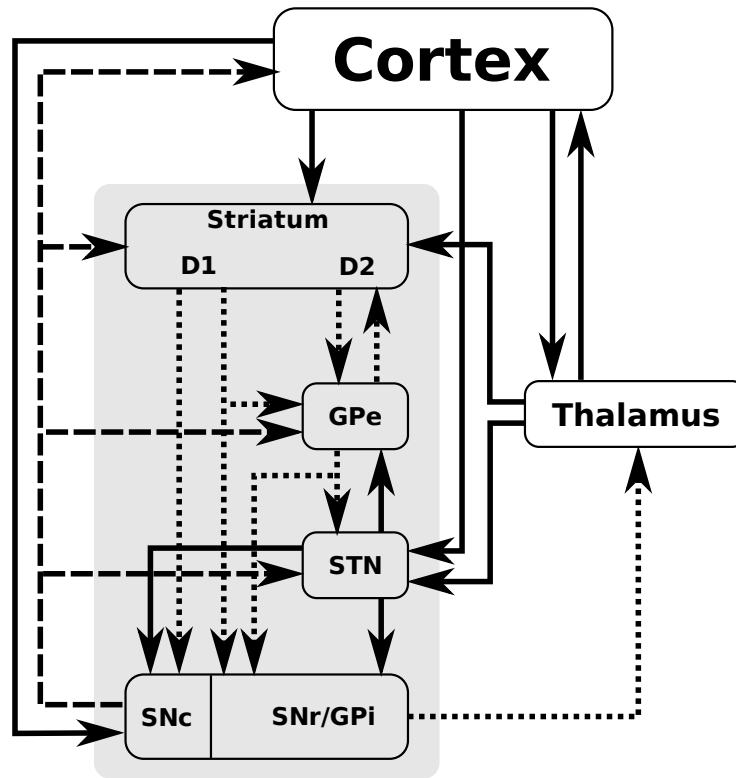


FIGURE 4.3 – Connexions internes des BG (région grisée). Flèches pleines : connexions glutaminergiques (excitatrices). Flèches pointillées : connexions GABAergiques (inhibitrices). Flèches en tirets : connexions dopaminergiques (renforcement). D'après [Redgrave, 2007]

minergiques de type D1), GPe (neurones dopaminergiques de type D2) et il existe également des connexions des D1 vers SNc et GPe [Parent et al., 2000] (cf. fig. 4.3). GPe projette des connexions inhibitrices sur STN mais également vers le striatum et GPi/SNr [Smith et al., 1998, Bevan et al., 1998]. STN projette des connexions excitatrices sur GPi/SNr, SNc et GPe. SNc projette en retour des connexions dopaminergiques modulatrices sur le striatum, GPe et STN (cf. fig. 4.3) [Redgrave, 2007].

Les BG forment avec le thalamus (Th) et le cortex des boucles parallèles bien séparées [Alexander et al., 1986], le cortex se projetant sur le striatum, mais également STN et SNc, et recevant des connexions dopaminergiques de SNc. Le cortex et le thalamus forment également une boucle. Le thalamus lui-même est connecté au striatum et STN et reçoit des connexions de GPi/SNr.

Il est important de noter qu'il existe également des boucles sous-corticales dans lesquelles la position du relais thalamique est changée – se trouvant en entrée de la boucle et non plus en sortie – recevant des entrées de la structure sous-corticale et se projetant sur le striatum. GPi/SNr projette alors directement des connexions inhibitrices vers la structure sous-corticale [McHaffie et al., 2005] (cf. fig. 4.4).

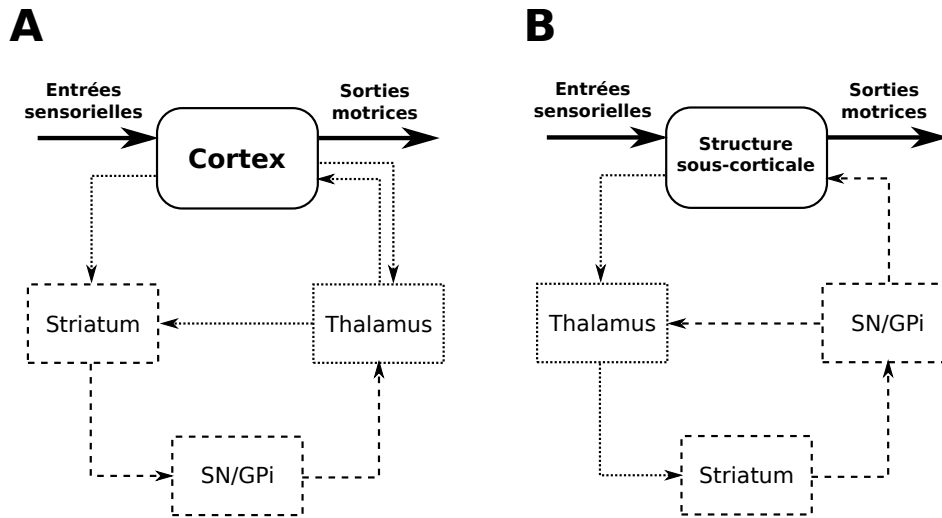


FIGURE 4.4 – Boucles sensori-motrices corticales (A) et sous-corticales (B) passant par les BG. La position du relais thalamique change dans les deux cas. En pointillé les régions et connexions à prédominances excitatrices, en tirets les régions et connexions à prédominances inhibitrices. D’après [McHaffie et al., 2005]

Cette combinaison de connexions excitatrices et inhibitrices, ainsi que cette structure bouclée, ont pour effet d’amplifier le contraste entre les différents canaux en entrée. Ainsi, par le jeu des excitations locales et des inhibitions globales, une forte entrée sur un canal provoquera l’inhibition des autres canaux moins excités. D’une certaine façon, on peut donc voir les ganglions de la base comme un module de sélection. Ainsi leur rôle dans les actions motrices, par exemple, s’explique simplement par le fait qu’il est nécessaire qu’une seule commande (corticale par exemple) ait accès à une ressource motrice à un instant donné. Or comme les structures corticales fonctionnent constamment en parallèle et en concurrence (et potentiellement de manière opposée), les BG assurent la cohérence des « décisions ». Ainsi une déficience des BG explique assez bien les symptômes de la maladie de Parkinson, se caractérisant par des mouvements incohérents et incontrôlés [Mink, 1996, Redgrave et al., 1999].

De plus, on sait que les BG, par l’intermédiaire de neurones modulateurs dopaminergiques, sont impliqués dans les mécanismes d’apprentissage par renforcement [Schultz et al., 1997, Hikosaka et al., 2006]. Tout ceci nous permet donc de concevoir les BG comme un module de sélection capable d’apprendre à sélectionner les entrées favorisant une récompense.

4.2.4 Circuit saccadique

Le circuit saccadique du cerveau implique un certain nombre de structures corticales et sous-corticales, organisées selon deux voies principales (fig. 4.5).

Dans la voie sous-corticale, les entrées de la rétine se projettent directement

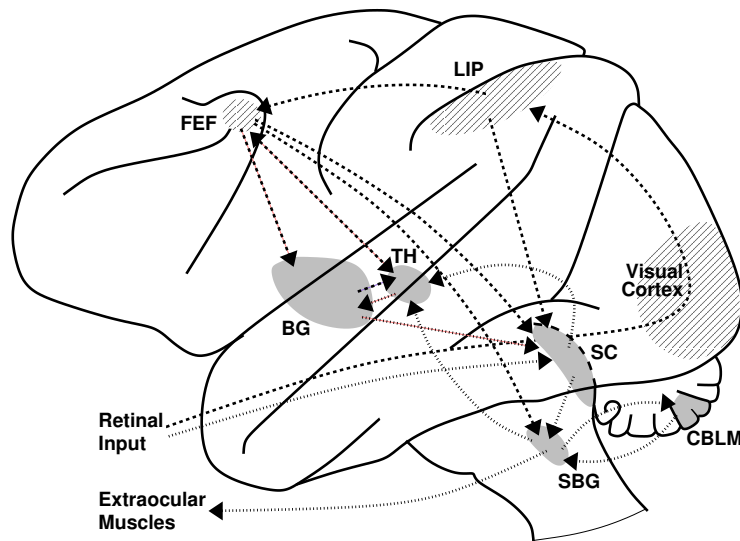


FIGURE 4.5 – Circuit saccadique chez le macaque, connexions sous-corticales en pointillés, connexions corticales en tirets. BG : ganglions de la base ; CBLM : Cervelet ; FEF : Champs oculaires frontaux ; LIP : Cortex latéral intrapariétal ; SBG : générateur de saccades ; SC : colliculus supérieur ; TH : thalamus. Tiré de [N’Guyen et al., 2010b]

sur la couche superficielle du colliculus supérieur (SCs), dont les couches profondes (SCi) se projettent ensuite sur des noyaux de la formation réticulée (tronc cérébral) appelés générateurs de bouffés saccadiques (*saccade burst generator*, SBG), contrôlant directement les motoneurones oculaires. Les SBG sont divisés en deux parties : les SBG verticaux et les SBG horizontaux chargés de commander respectivement les composantes verticales et horizontales du mouvement (pour une revue voir [Scudder et al., 2002]).

Deux dérivations sont ajoutées à ce circuit basique : une boucle « colliculus supérieur-thalamus-ganglions de la base-colliculus supérieur » (STBS) [McHaffie et al., 2005] – qui est probablement impliquée dans la sélection de cible – et le circuit « colliculus supérieur-cervelet-générateur de saccade », – probablement impliqué dans la calibration du système.

La voie corticale part de la rétine à travers les zones visuelles du cortex, vers le cortex latéral intrapariétal (LIP) et le champ oculaire frontal (FEF). LIP et FEF se projettent ensuite sur la voie sous-corticale par le SC. Il existe également des projections mineures des FEF vers les SBG. Finalement, une boucle « cortico-basothalamo-corticale » (CBTC) affecte également les processus de sélection dans la voie corticale.

Le cortex visuel, le LIP, le FEF et le SC sont organisés en couches de cartes rétinotopiques représentant le champ visuel. Chez le rat, la topologie des cartes semble être linéaire [Siminoff et al., 1966], c’est-à-dire que la position des cibles est encodée dans un espace rétinotopique avec une cartographie linéaire (cette cartographie est

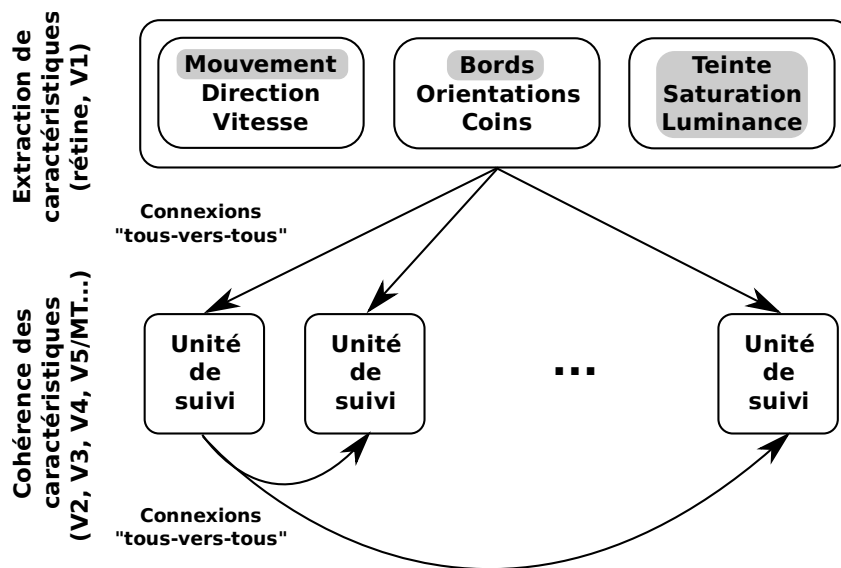


FIGURE 4.6 – Schéma décrivant le traitement visuel du processeur BIPS. En haut les différentes caractéristiques extraites du flux vidéo, similaires à celles que l’on peut trouver au niveau de l’aire V1. En grisé les traitements similaires à ceux effectués au niveau de la rétine. En bas, une fois les caractéristiques extraites, elles peuvent être traitées et combinées dans les unités de suivi (cellules) permettant de ne prendre en compte que les caractéristiques « cohérentes ». Ces combinaisons d’unités de suivi peuvent être vues comme des traitements effectués au niveau du cortex extra-strié.

logarithmique chez les animaux pourvus de fovéa comme le primate par exemple).

Les saccades sont donc encodées spatialement par l’activité au sein des cartes du SC. Afin de pouvoir commander les SBG, elles doivent donc être décodées en composantes horizontales et verticales, sous forme de bouffées d’activité dont l’intégrale représente l’amplitude de la composante considérée. Ce processus est qualifié de « transformation spatio-temporelle ».

4.3 Système visuel artificiel

Processeur BIPS Le système visuel artificiel que nous avons implémenté sur Psikharpax se compose de capteurs d’images directement reliés à un processeur de traitement visuel BIPS (Bio-Inspired Perception System) développé par l’entreprise BVS (Brain Vision Systems)¹. Ce processeur fournit une « boîte à outils » de traitements visuels calculés en parallèle et en temps réel, ce qui présente des avantages computationnels évidents.

Le principe du flux de traitement est résumé en figure 4.6. Il se constitue d’un banc de filtres imitant les caractéristiques que l’on peut trouver dans la rétine et l’aire visuelle primaire (V1) décrites plus haut. Ces filtres peuvent être classés en 3

1. www.bvs-tech.com

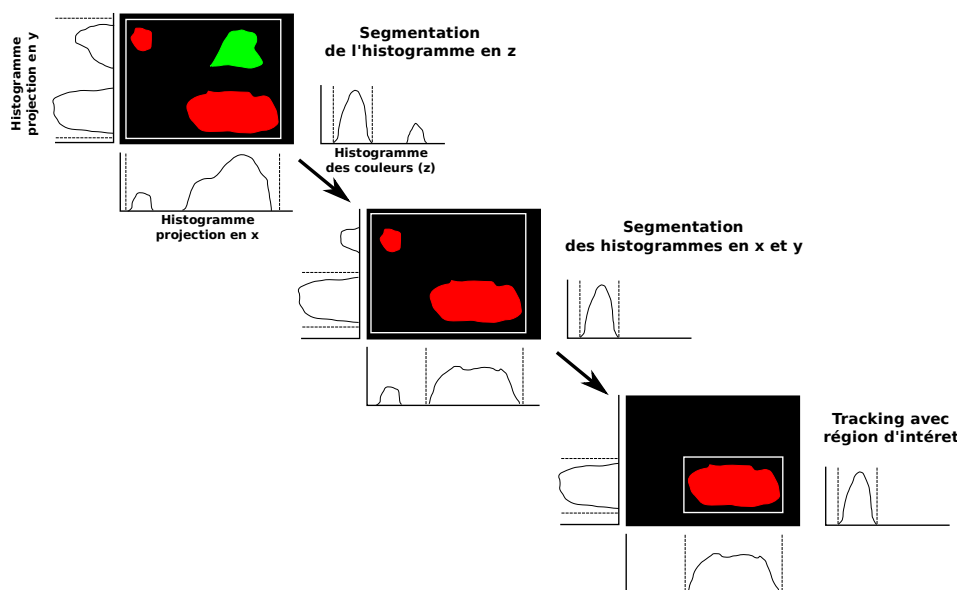


FIGURE 4.7 – Processus de segmentation et de suivi d'une « cellule », basé sur les histogrammes. Tout d'abord la zone d'intérêt de l'histogramme (cadre blanc et pointillés sur les histogrammes) est réduite pour ne sélectionner que le pic maximum. Puis les pixels résultants sont segmentés spatialement. Enfin la segmentation converge sur un maximum local.

catégories :

- Les filtres « tâches » : qui extraient les caractéristiques de teinte, saturation et luminance.
- Les filtres « structures » : qui extraient les caractéristiques des bords, orientations des bords et coins.
- Les filtres « mouvement » : qui extraient les caractéristiques de variabilités temporelles, directions et vitesses.

Les résultats de ces différents filtres sont fournis en entrées des unités de *tracking* – ou « cellules » – qui permettent une segmentation et un suivi de caractéristiques dans le flux vidéo. Chacune de ces cellules a la possibilité de segmenter l'image par extraction du pic maximum sur l'histogramme du filtre (histogramme en z), puis sur les histogrammes des projections selon les axes x et y (cf. fig. 4.7). Ce processus est bouclé, c'est-à-dire que la segmentation de l'histogramme en z influe sur le nombre de pixels présents à l'image et donc influe sur les histogrammes de projections. Ce bouclage permet au processus de suivi de converger vers un maximum local. L'information de localisation des objets (x et y) est donc séparée des caractéristiques (z) et le processus de suivi ne converge que si ces deux informations sont « cohérentes ». Par exemple si l'on segmente une caractéristique très présente, mais que celle-ci ne correspond qu'à des pixels dispersés (bruit), le processus « s'effondre » et aucun objet n'est suivi. En revanche si, au sein du bruit, il existe une zone plus dense, le

processus converge vers cette zone et la suit.

Il est également possible de combiner l'histogramme en z avec une segmentation paramétrique sur un autre filtre. Cette méthode permet de combiner deux filtres comme, par exemple, l'extraction des bords (dans une plage d'intensité fixe) et les orientations – pour obtenir des bords orientés – ou bien la teinte et la saturation – pour ne travailler que sur des teintes saturées (les teintes faiblement saturées représentent souvent du bruit). Il est également possible de « débrayer » le mécanisme d'extraction du pic maximum afin de sélectionner une zone quelconque sur n'importe quel histogramme pour, par exemple, ne travailler que sur la teinte de la peau (histogramme en z), ou dans une région particulière (histogrammes en x et y).

Enfin, les différentes cellules peuvent être combinées spatialement entre elles et travailler sur les caractéristiques ou sur les pixels segmentés par d'autres cellules. Il est ainsi possible de configurer des inhibitions mutuelles entre les cellules afin que celles-ci ne suivent pas le même objet. Ainsi une cellule suivant une main, par exemple, pourra inhiber spatialement les autres cellules de manière à ce qu'elles ignorent les pixels dans sa zone de suivi, ce qui permet de reproduire exactement le même mécanisme de suivi de main en « cascade » en étant certain que chaque cellule suivra une main différente. En connectant deux cellules afin que la première segmente une teinte particulière et que la seconde combine les bords orientés et les pixels segmentés par la première, nous pouvons, par exemple, ignorer les bords orientés de tout le reste de l'image et ainsi nous concentrer uniquement sur la teinte segmentée. On peut également « emboîter » les cellules de manière récursive et ainsi produire une segmentation hiérarchique de plus en plus précise [Ohlander et al., 1978]. Un tel mécanisme permet, par exemple, d'utiliser une cellule pour suivre une main, puis d'utiliser plusieurs cellules travaillant à l'intérieur de la zone de la main pour suivre les doigts individuellement, donnant ainsi encore plus de détails sur la main suivie.

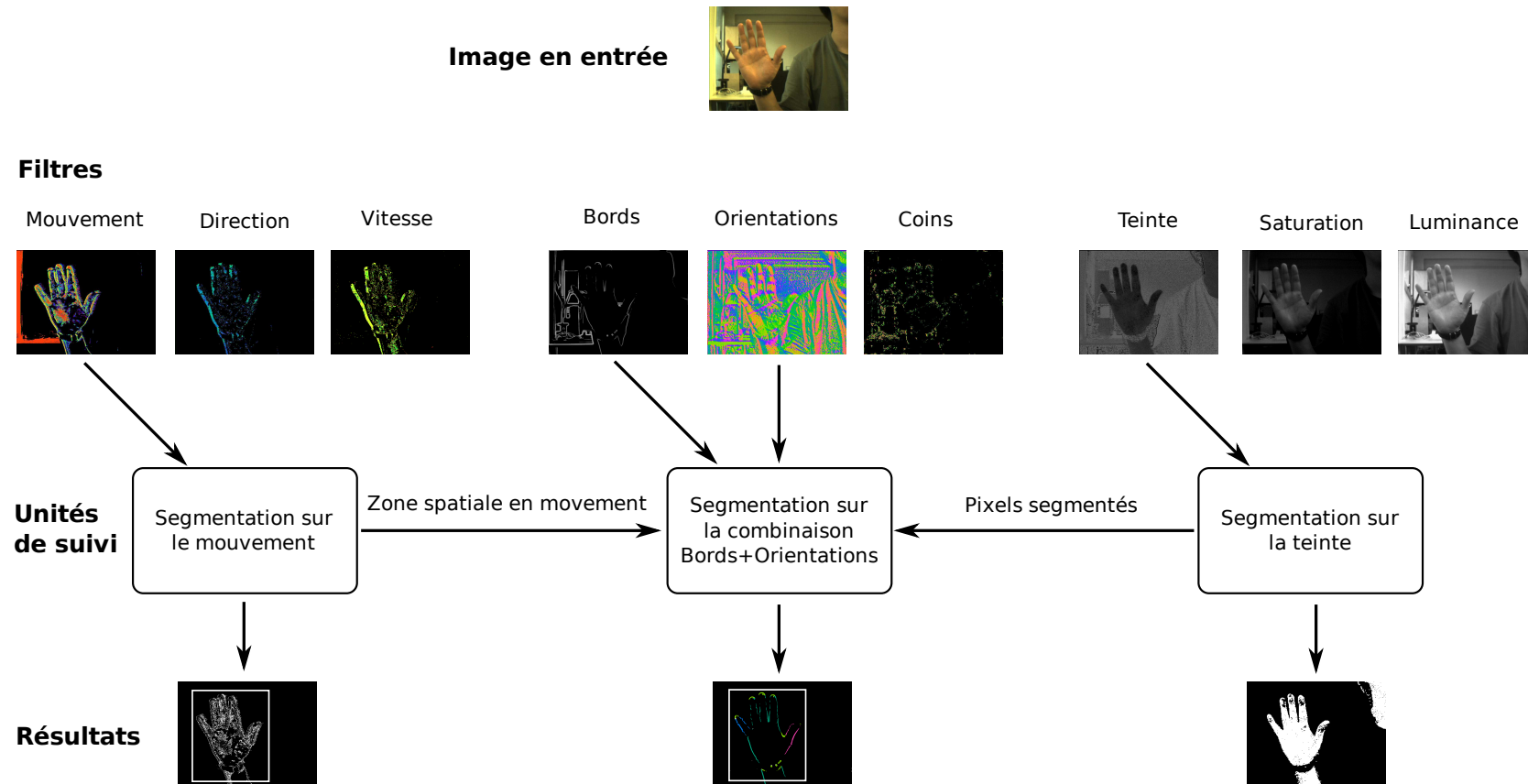


FIGURE 4.8 – Exemple d’application de suivi d’une main en mouvement avec extraction de ses bords orientés. Les flèches entre les filtres et les unités de suivi, ainsi qu’entre unités de suivi, représentent les connexions actives.

La figure 4.8 montre un exemple d'application comprenant trois cellules interconnectées. Une cellule prenant en entrée le filtre de mouvement, la seconde les bords et les orientations, et la troisième la teinte. La première cellule segmente et suit le mouvement maximum et extrait une zone d'intérêt (cadre). La troisième segmente la teinte correspondante à la peau. La deuxième combine les bords et les orientations (afin d'obtenir des bords orientés), uniquement sur les pixels segmentés par la troisième cellule et à l'intérieur de la zone d'intérêt de la première cellule. Le résultat, ici, est le suivi de la main lorsque celle-ci est en mouvement, avec extraction de ses bords orientés (ce qui permet par exemple de déterminer son orientation).

De plus, le système étant doté de deux caméras, il est possible d'effectuer de la vision binoculaire. La méthode naïve employée ici consiste à effectuer un suivi d'abord sur une des caméras (qui sera en quelque sorte l'œil « dominant »), puis de contraindre un suivi sur l'autre œil avec la même segmentation d'histogramme z et la même zone verticale (cf. fig. 4.9). Si un appariement binoculaire est possible, les deux yeux doivent suivre un objet dans la même zone verticale ayant sensiblement les mêmes caractéristiques (valeurs dans l'histogramme en z et taille de la boîte englobante). La différence de position horizontale donnera donc la disparité binoculaire. Une fois l'appariement effectué, il est également possible de commander des mouvements de vergence.

Tout ces mécanismes font partie des possibilités offertes par la « boîte à outil » perceptive du processeur BIPS. Cependant les mécanismes décrits ici ne sont, bien sûr, ni imposés ni fixés. Afin de produire l'application souhaitée il est nécessaire de configurer dynamiquement le système si l'on veut, par exemple, modifier les connexions entre les cellules ou leurs entrées à la volée.

La configuration des connexions et des mécanismes de classification sur les histogrammes, permet au système de renvoyer un résultat de perception (boîte englobante, nombre de pixels segmentés, position des centres de gravité. . .) fourni par le BIPS à la réception de chaque image. Il est ensuite nécessaire d'analyser ce résultat et de générer une nouvelle configuration selon les besoins.

Algorithme de vision utilisé Dans le travail décrit ici, nous cherchons à percevoir les positions et caractéristiques de cibles visuelles afin de générer des saccades. Nous choisissons donc de nous limiter à la perception d'objets colorés dans la mesure où le protocole expérimental se compose d'objets colorés sur fond noir.

L'algorithme de vision nécessaire à un tel comportement reste donc assez simple (cf. fig. 4.10). Nous utilisons en effet le principe de recrutement dynamique et en cascade de cellules évoqué plus haut, lequel permet de trouver et de suivre plusieurs objets différents. En premier lieu, nous nous attachons à détecter les mouvements dans l'image, ce qui permet de nous focaliser sur les événements potentiellement intéressants – c'est-à-dire sur les changements survenant dans la scène – et ainsi d'extraire un ou plusieurs objets du fond. Une cellule est donc allouée dynamiquement à chaque zone compacte en mouvement dans la scène (l'apparition soudaine d'un objet étant suffisante pour provoquer du mouvement). Puis, à l'intérieur de la

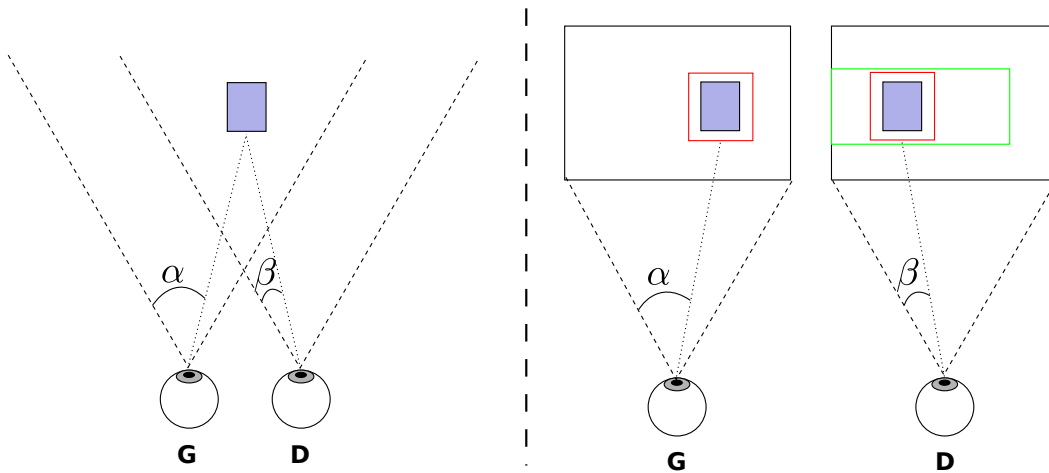


FIGURE 4.9 – Calcul simpliste de la disparité binoculaire. À gauche, scène vue de manière binoculaire. À droite, détail des images vues par chaque œil. En rouge le résultat du suivi (boîte englobante), en vert la zone de recherche imposée par l'œil gauche « dominant » pour l'appariement. À l'intérieur de cette zone, l'œil droit ne suit que les objets de mêmes caractéristiques. Une fois l'appariement effectué les deux yeux suivent le même objet et la disparité peut être calculée par la différence de position $\alpha - \beta$.

zone en mouvement (connexion emboîtée), nous recrutons une cellule pour suivre la teinte dominante si celle-ci existe (c'est-à-dire si le nombre de pixels suivis dépasse un certain seuil). Une fois la teinte dominante suivie, nous inhibons cette zone afin que les autres cellules n'y cherchent plus ni mouvement ni teinte (connexions inhibitrices). Il s'avère alors possible de déconnecter et de « recycler » la cellule ayant servi à suivre le mouvement (cellules 1 et 3 dans la figure 4.10) pour rechercher et suivre une nouvelle zone en mouvement. Nous obtenons ainsi, pour chaque image, le nombre d'objets détectés, leurs tailles, positions et caractéristiques (teinte dominante).

On notera que cet algorithme peut être appliqué au principe de suivi binoculaire décrit plus haut et fournir une information de disparité, mais nous ne nous en servons pas ici.

En revanche, on notera également que le BIPS est utilisé ici comme un « filtre » ne laissant passer que les zones colorées. Cette étape de pré-traitement « câblé » nous permet de simplifier l'environnement, mais toute autre méthode fournissant positions et caractéristiques pourrait être utilisée. Les informations extraites ici sont ensuite fournies en entrée du modèle de génération de saccades. Les informations de position des objets simulent alors les entrées directes de la rétine et les informations sur les caractéristiques (les couleurs) simulent les entrées corticales.

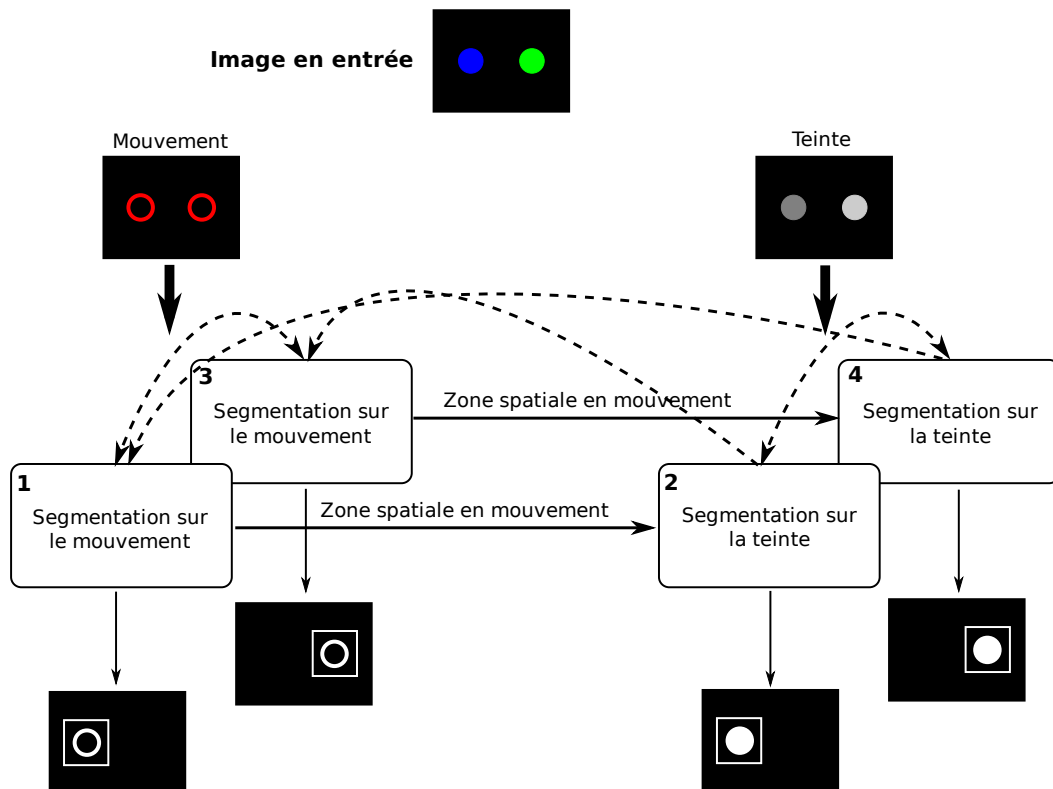


FIGURE 4.10 – Algorithme basique de suivi « événementiel » en cascade [Pirim and Sikora, 2009]. L’apparition de l’image d’entrée provoque une variabilité (mouvement) détectable par le filtre de mouvement. Les flèches pleines entres cellules représentent les « emboîtements » de zones de recherche. Les flèches en tirets représentent les inhibitions spatiales entre cellules. Les numéros à l’intérieur des cellules représentent les identifiants (dans cet exemple 4 cellules sont utilisées).

4.4 Génération de saccades

4.4.1 Description du modèle

Le modèle présenté ici (fig. 4.11) reçoit donc les entrées visuelles pré-traitées par le BIPS selon la méthode décrite plus haut et sélectionne ensuite les cibles des saccades sur la base de leurs positions dans le champ visuel et de leurs caractéristiques. Il peut apprendre quelles positions et quelles caractéristiques favoriser en utilisant l’apprentissage par renforcement de type *TD-learning* (différences temporelles). Ce modèle est alors capable de générer les ordres moteurs des saccades oculaires en direction des cibles récompensées [N’Guyen et al., 2010b].

Entrées visuelles Selon la neuro-anatomie de la boucle STBS, l’information de la position de la cible est fournie par le système visuel du robot (Section. 4.3) et correspond à la projection directe de la rétine sur les couches superficielles du SC.

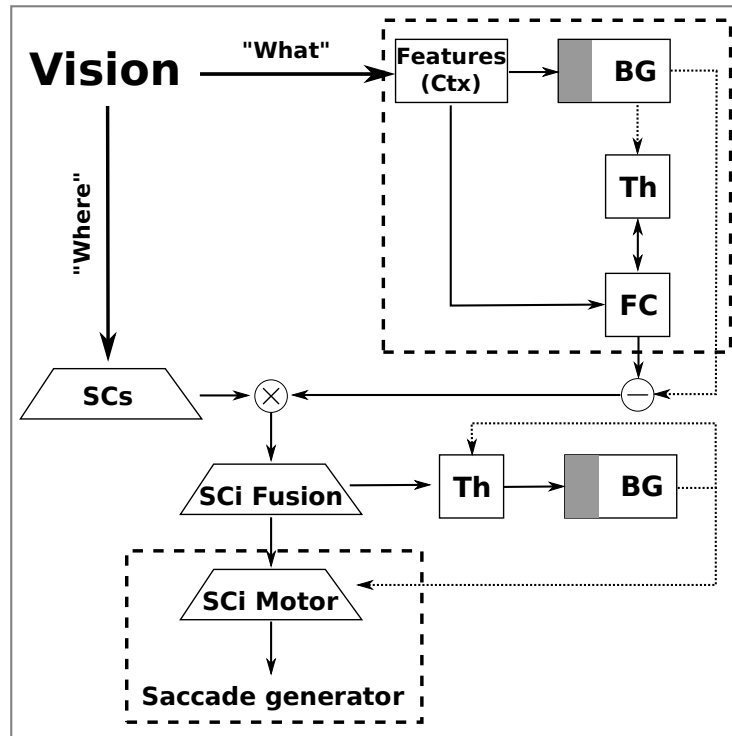


FIGURE 4.11 – Structure du modèle, SCi : Couches intermédiaires du SC ; SCs : Couches superficielles du SC ; FC : cortex frontal ; zone entourée en pointillés en bas : modèle de SC [Tabareau et al., 2007], zone entourée en pointillés en haut à droite : modèle de CBTC [Girard et al., 2008]

La détection des caractéristiques visuelles (les couleurs) est fournie en entrée de la partie corticale du modèle, où la sélection des caractéristiques pertinentes est effectuée par une boucle CBTC en utilisant le modèle de [Girard et al., 2008] (cf. fig. 4.14).

L'entrée visuelle du modèle en rapport avec la position des cibles est transformée en une carte rétinotopique composée de 120×23 neurones intégrateurs à fuite, à taux de décharge de type IPDS [Girard et al., 2008]. La géométrie de cette carte est linéaire et représente un champ sensoriel de 240° par 45° . Toutes les cartes du SC dans le modèle ont la même taille, la même géométrie et utilisent le même modèle de neurone. Chaque unité de la partie striatum des BG (dans la boucle STBS) reçoit des entrées de 4 unités du SC. Réciproquement, le GPi se projette en retour sur 4 unités du SC, reproduisant d'une certaine manière les propriétés « d'entonnoir » de la connectivité SC-BG [Chambers et al., 2005]. Ainsi les BG dans la boucle STBS comportent 60×12 (720) canaux. Dans la boucle non-spatiale (CBTC), les couleurs sont décomposées en 16 valeurs et, par conséquent, les BG correspondants possèdent 16 canaux.

2. Il est à noter que le champ sensoriel total est plus grand que le champ visuel pour extension à l'audition et au toucher.

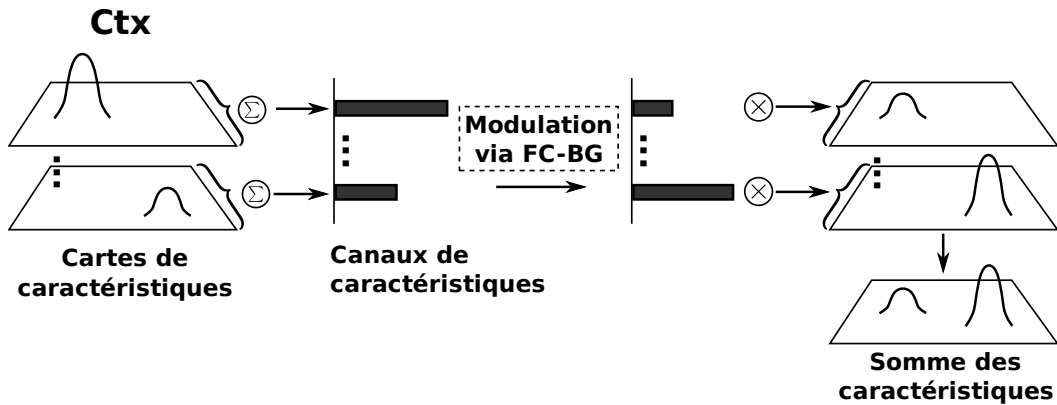


FIGURE 4.12 – Transformation « caractéristiques vers spatial ». En admettant que chaque canal de caractéristique (par exemple chaque couleur) module l'activité de toute une carte de caractéristique (par exemple une carte représentant une couleur), chaque objet perçu est représenté par une activité gaussienne dont la position rétinotopique est préservée. L'amplitude d'activité représente l'amplitude de la caractéristique (par exemple la quantité d'une couleur donnée dans l'objet).

Concernant les caractéristiques visuelles, les entrées du modèle sont transformées en une famille de cartes (cartes de caractéristiques), chacune encodant dans le référentiel rétinotopique l'activité des neurones répondant à une caractéristique particulière (fig. 4.12, gauche). Ici ces caractéristiques se limitent aux couleurs décomposées en 16 valeurs (et donc 16 cartes).

Sélection dans les BG La sélection des caractéristiques visuelles à favoriser dans la boucle CBTC est basée sur les canaux de caractéristiques recevant les sommes des activités des cartes de caractéristiques (fig. 4.12, modulation via FC-BG). À la sortie, l'interaction entre FC et les BG crée de nouveaux canaux modulés (FC tend à amplifier les canaux et les BG tendent à désinhiber seulement le canal maximum). L'amplitude du canal résultant est l'activité du FC moins l'activité du GPI, un canal fort sera amplifié par le FC et complètement désinhibé par les BG, alors qu'un canal faible sera peu amplifié par le FC et complètement inhibé par les BG. L'interaction FC-BG tend donc à amplifier le contraste entre les canaux en entrée.

Finalement, les cartes de caractéristiques normalisées sont multipliées par les canaux dans le but d'obtenir des cartes de caractéristiques modulées. La carte fusionnée (SCi Fusion dans la figure 4.11) est obtenue en modulant l'activité de la carte de localisation (SCs dans la figure 4.11) par la carte des caractéristiques modulées (somme de toutes les caractéristiques, fig. 4.12, en bas à droite). Cette carte fusionnée représente la « saillance », c'est-à-dire le niveau d'émergence d'un objet par rapport au fond. Plus un objet est saillant, plus il attire l'attention.

La carte fusionnée passe ensuite par une sélection spatiale dans la boucle STBS. La boucle STBS est construite en utilisant un modèle du circuit sous-cortical des ganglions de la base, basé sur le modèle proposé dans [Girard et al., 2008] dans lequel

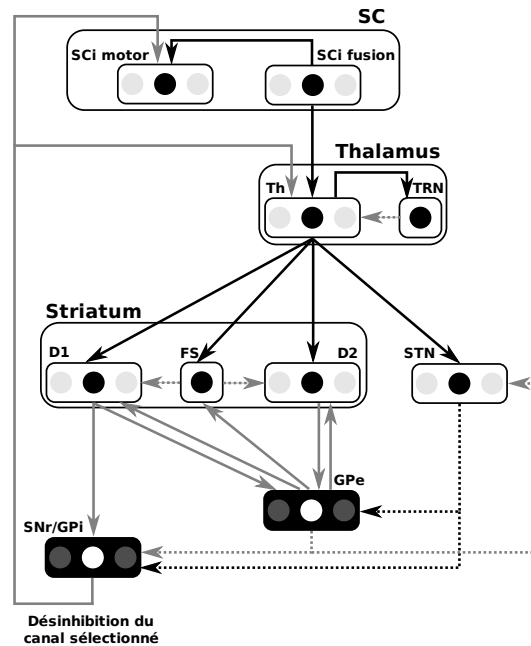


FIGURE 4.13 – Modèle de la boucle STBS. 3 canaux sont représentés, le canal du milieu étant le plus activé. SNr/GPi ainsi que GPe sont en couleurs inversées car au niveau de ces structures l'activité des canaux est opposée. Le deuxième canal qui est le plus activé en entrée est le plus faiblement activé dans ces structures. La partie thalamus (Th) est constituée du noyau dorsomédian ainsi que du noyau réticulaire (TRN) qui constitue une population ne contenant pas de canaux séparés. Le striatum est composé de deux types de neurones à récepteurs dopaminergiques D1 et D2 ainsi que d'une population d'interneurones à décharges rapides (*fast-spiking*, FS). En noir les connexions excitatrices, en gris les connexions inhibitrices. En traits pleins les connexions *one-to-one*, en pointillés les connexions diffuses *one-to-all*.

la partie corticale a été retirée et la position du thalamus changée, conformément à l'anatomie (cf. fig. 4.13).

De manière similaire à la boucle CBTC, dans STBS, la cible la plus intense sera sélectionnée par une désinhibition du GPi afin de ne conserver l'activité que d'une seule cible. Le reste de la carte reste inhibé.

Ici, les capacités d'apprentissage permettent de biaiser la désinhibition des BG en faveur des caractéristiques récompensées (dans CBTC) ou des positions récompensées (dans STBS).

Dans chacune des boucles, les BG opèrent une sélection autonome permettant de ne se focaliser que sur une caractéristique et une position.

Apprentissage dans les BG Les paramètres des deux modèles de BG ont été adaptés afin de fonctionner correctement avec le nombre de canaux nécessaires dans notre implémentation (720 dans STBS et 16 dans CBTC). Les BG des boucles STBS et CBTS utilisent le même algorithme d'apprentissage par renforcement de

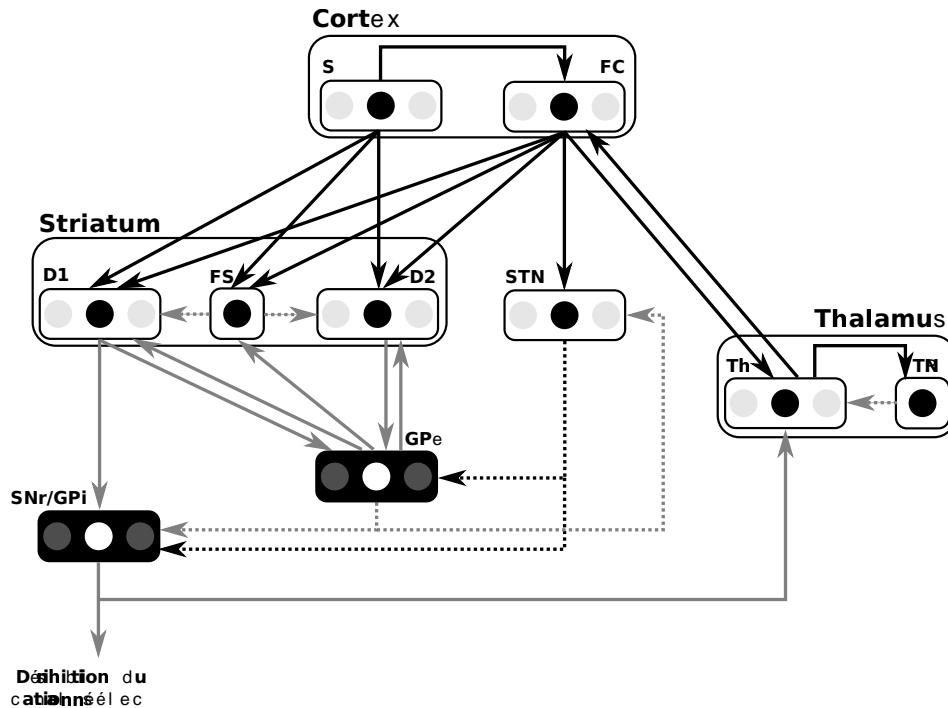


FIGURE 4.14 – Modèle de la boucle CBTC. Le système est le même qu’en fig. 4.13 à la différence de la position du thalamus et de la présence du cortex plutôt que du colliculus supérieur. D’après [Girard et al., 2008]

type *Temporal Difference Learning* [Sutton, 1988, Sutton and Barto, 1998].

Les poids de projection des entrées des BG (grisées dans la fig. 4.11) sont appris en utilisant l’implémentation neuromométique basique de l’algorithme *Actor-Critic* proposé dans [Montague et al., 1996]. Ceci permet au système d’apprendre qu’une position (ou une caractéristique) est plus récompensée qu’une autre et, donc, de biaiser le processus de sélection lorsque plusieurs cibles sont perçues. Sans apprentissage, les BG tendent à ne sélectionner que l’entrée la plus intense. L’apprentissage permet ici, en plus, d’orienter cette sélection vers les cibles récompensées. Une cible récompensée, même de faible intensité, sera amplifiée par les poids appris et sera donc vue comme très intense par les BG, augmentant ainsi sa probabilité d’être sélectionnée.

Dans les boucles STBS et CBTC, l’apprentissage par renforcement est calculé comme suit (cf. fig. 4.15 (droite)) :

Tout d’abord la *TD-error* δ est calculée

$$\delta = R_t + (\gamma \times V_t) - V_{t-1} \quad \text{avec} \quad V_t = W_{Critic} \cdot Input_t$$

R_t étant la récompense, V_t étant la fonction de valeur estimée au temps t , W_{Critic} les poids d’entrée du Critique, $Input_t$ la matrice d’entrée (carte fusionnée ou canaux de caractéristiques) et γ le facteur d’amortissement (*discount factor*), $\gamma = 0.7$ partout. Ensuite les poids du Critique sont mis à jour en utilisant les traces d’éligibilité

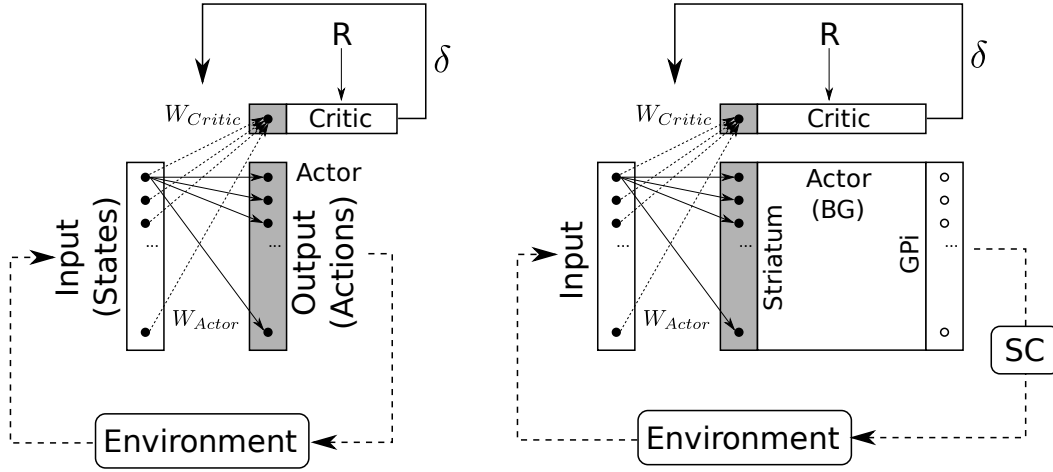


FIGURE 4.15 – (Gauche) « Acteur-Critique » classique. (Droite) Implémentation de l’Acteur-Critique dans le modèle de BG. Les traces d’éligibilités, agissant comme une mémoire, ne sont pas représentées.

E_{Critic} :

$$W_{Critic} \leftarrow W_{Critic} + \eta \times \delta \times E_{Critic} \quad \text{avec} \quad E_{Critic} \leftarrow \alpha \times E_{Critic} + Input_{t-1}$$

η est le taux d’apprentissage fixé à 0,0005 et α le facteur de décroissance des traces d’éligibilités fixé à 0,9 (ces paramètres sont identiques dans tous les circuits BG). La taille du vecteur de poids du Critique est N , la taille du vecteur $Input$, donc les connexions sont de type « tous-vers-un ». Le vecteur d’actions, qui est l’entrée pondérée, est calculé par :

$$A_t = W_{Actor} \cdot Input_t$$

Les poids de l’Acteur sont mis à jour suivant :

$$W_{Actor} \leftarrow W_{Actor} + \eta \times \delta \times E_{Actor} \quad \text{avec} \quad E_{Actor} \leftarrow \alpha \times E_{Actor} + Input_{t-1} \otimes A'_{t-1}$$

$$\text{et} \quad A'_{t-1} = 1 - GPI_{t-1}$$

La matrice de poids de l’Acteur est de taille $N \times N$ donc les connexions sont de type « tous-vers-tous ». Ici, comparé à l’apprentissage par renforcement « classique » (cf. fig. 4.15 (gauche)), on peut voir que les « États » sont les entrées à sélectionner et les « Actions » sont les entrées pondérées selon le biais des récompenses. Les ganglions de la base calculent une sélection de ces entrées pondérées et ensuite le GPI se projette vers le SC pour éventuellement déclencher une action. L’apprentissage est donc ici légèrement différent du renforcement « classique » puisque l’Acteur ne déclenche pas directement une action. Son effet sur l’environnement est indirect et passe par le SC.

Sortie motrice La couche motrice prend en entrée une carte fusionnant les informations de positions et de caractéristiques (carte fusionnée), dans laquelle la cible

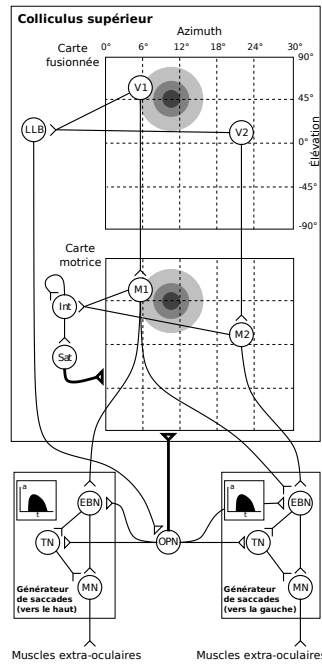


FIGURE 4.16 – Architecture de la couche motrice du modèle (avec géométrie linéaire). Seulement un colliculus (demi champ droit) et deux SBG sont représentés (sans les projection IBN croisées) ainsi que deux neurones par carte colliculaire (V1 et V2 dans la carte visuelle, M1 et M2 dans la carte motrice). Les disques grisés représentent l'activité gaussienne générée par une cible (coordonnée $(10^\circ, 10^\circ)$, soit $R = 10^\circ$, $\theta = 45^\circ$), les courbes dans les générateurs de saccades représentent le codage temporel dans les EBNs généré pour contrôler les muscles. Les triangles ouverts représentent les synapses excitatrices; les triangles représentent les synapses inhibitrices; les connexions en gras affectent toute une carte. Adapté de [Tabareau et al., 2007]

la plus saillante est sélectionnée par les BG (boucle STBS). Après sélection dans la boucle STBS, la carte fusionnée se projette sur la carte motrice (cf. fig. 4.11)

Le problème de la transformation de l'encodage topologique de la cible sélectionnée dans la sortie du colliculus en une commande bi-dimensionnelle est résolu en utilisant le modèle de colliculus supérieur proposé dans [Tabareau et al., 2007] et simplifié afin d'utiliser des cartes de géométrie linéaire du champ visuel (fig. 4.16).

Les neurones *long lead burst* (LLB) reçoivent l'activité globale de la carte d'entrée. Quand celle-ci dépasse un certain seuil, les LLB inhibent les neurones omnipauses (OPN) qui bloquent l'activité de la carte motrice ainsi que les SBG par une forte inhibition globale. Ainsi la carte d'entrée se projette neurone à neurone sur la carte motrice dont l'activité est intégrée par les EBN/IBN (neurones à bouffée de décharge, excitateurs et inhibiteurs) des SBG. Puis la commande des EBN/IBN est intégrée par le couple TN/MN (neurones toniques et motoneurones). L'activité des MN est ensuite transmise à un modèle mécanique de l'œil. En parallèle, l'activité

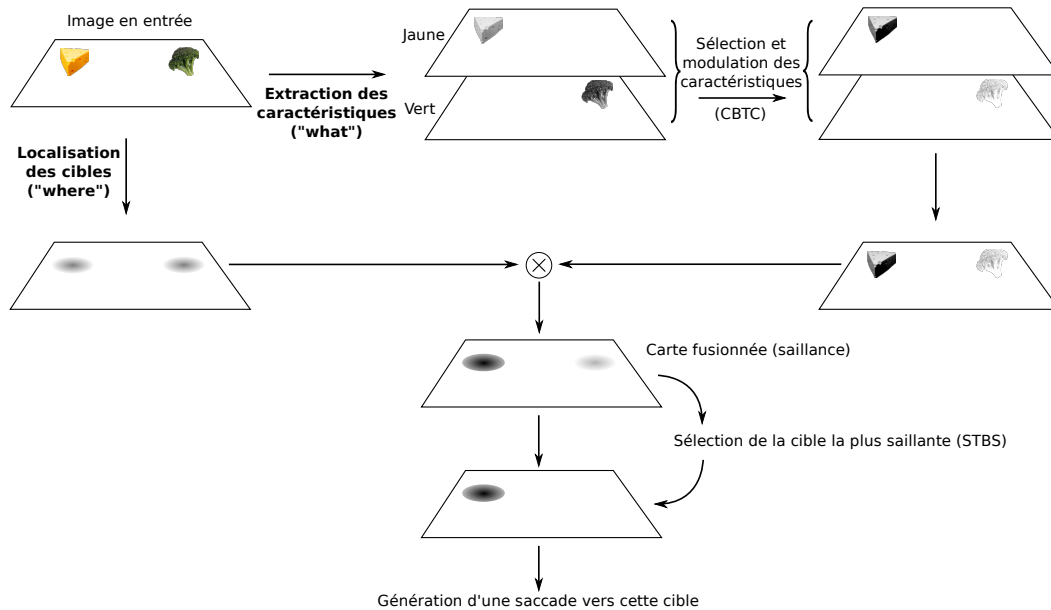


FIGURE 4.17 – Exemple de fonctionnement du modèle. Nous faisons l’hypothèse que les deux objets comportent des caractéristiques bien séparées (jaune et vert). La sélection et la modulation des caractéristiques se fait grâce à la boucle CBTC (cf. fig. 4.12). La carte fusionnée obtenue possède alors deux activités d’intensités différentes. La sélection de la cible la plus saillante se fait grâce à la boucle STBS.

de la carte motrice est intégrée et, lorsque celle-ci dépasse un certain seuil, elle est inhibée et la saccade s’arrête. Pour plus de détails voir [Tabareau et al., 2007].

Exemple La figure 4.17 montre un exemple de fonctionnement du modèle en présence de deux objets. La position de chaque objet se projette sous forme d’une activité gaussienne sur la carte SCs (cf. fig. 4.11). Les caractéristiques (jaune et vert) sont sélectionnées et modulées par la boucle CBTC permettant d’amplifier la caractéristique la plus forte (ici le jaune) et d’affaiblir la plus faible (vert). L’intensité des caractéristiques obtenues module ensuite les activités de la localisation, donnant la carte de saillance. La cible résultante de plus forte intensité est ensuite sélectionnée à travers la boucle STBS, puis une saccade vers celle-ci est générée par l’intermédiaire de la carte motrice (cf. fig. 4.16).

4.5 Expériences

4.5.1 Dispositif expérimental

Des expériences ont été conduites en utilisant la plate-forme robotique Psikharpax (cf. fig. 4.18, gauche). Cette plate-forme est équipée de 2 caméras VGA miniatures (champ visuel d’approximativement 60° horizontalement et 45° verticalement), chacune montée sur un mécanisme pan-tilt à servomoteur. Le traitement

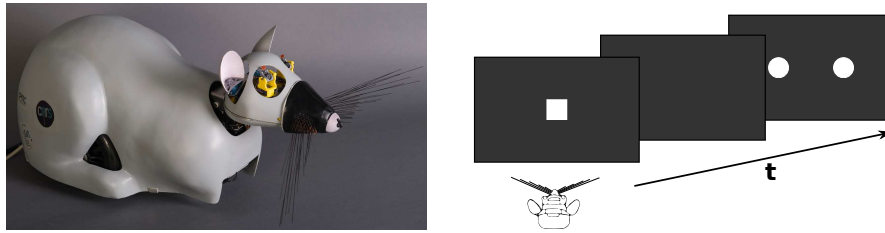


FIGURE 4.18 – (Gauche) Photo de la plate-forme robotique Psikharpax. (Droite) Schéma du protocole expérimental. Exemple pour un signal de fixation suivi par un écran noir puis 2 cibles.

visuel est calculé en temps réel en utilisant 2 processeurs BVS BIPS (cf. Section 4.3).

Le comportement du système a été testé dans un certain nombre de tâches en plaçant la tête du robot en face d'un écran LCD de 100 cm de large à une distance de 65 cm (fig. 4.18, droite) sur lequel des signaux de fixation et des cibles colorés sont affichés avec un fond noir, selon le protocole expérimental classiquement utilisé avec les animaux [Hikosaka et al., 1989].

4.6 Résultats

4.6.1 Comportements basiques

En premier lieu, nous avons testé le fonctionnement du système en reproduisant les comportements de base décrits dans [Hikosaka et al., 1989], c'est-à-dire la tâche de saccade (*saccade task*), la tâche de fixation (*fixation task*) et la tâche de chevauchement (*overlap task*). Ces tâches ont été apprises en utilisant le paradigme de conditionnement selon lequel le système reçoit une récompense positive lorsqu'il réussit et une récompense négative (punition) lorsqu'il échoue. En revanche, comme notre modèle « sous-cortical » ne contient pas de mémoire de travail, il ne lui est pas possible de reproduire la tâche différée (*delayed task*). Les résultats correspondants sont résumés dans la figure 4.19.

- Tâche de saccade : le comportement basique de déclenchement de saccade est bien reproduit. Lorsqu'une cible apparaît le neurone du GPi correspondant désinhibe la zone motrice du SCi correspondante et déclenche une saccade.
- Tâche de fixation : le système réussit bien à apprendre à fixer continuellement l'indice de fixation (indice « intéressant »), tout en ignorant l'indice distracteur. L'activité du GPi à l'emplacement du distracteur ne montre pas de désinhibition, empêchant ainsi toute activité dans la couche motrice des SCi et empêchant donc de déclencher une saccade.
- Tâche de chevauchement : ici encore le système apprend avec succès à réussir cette tâche. Le neurone du GPi correspondant à la cible ne commence à désinhiber que lorsque l'indice de fixation disparaît. La saccade, qui n'est pas déclenchée quand la cible apparaît (cible+fixation), est déclenchée quand l'indice de fixation disparaît (cible seulement).

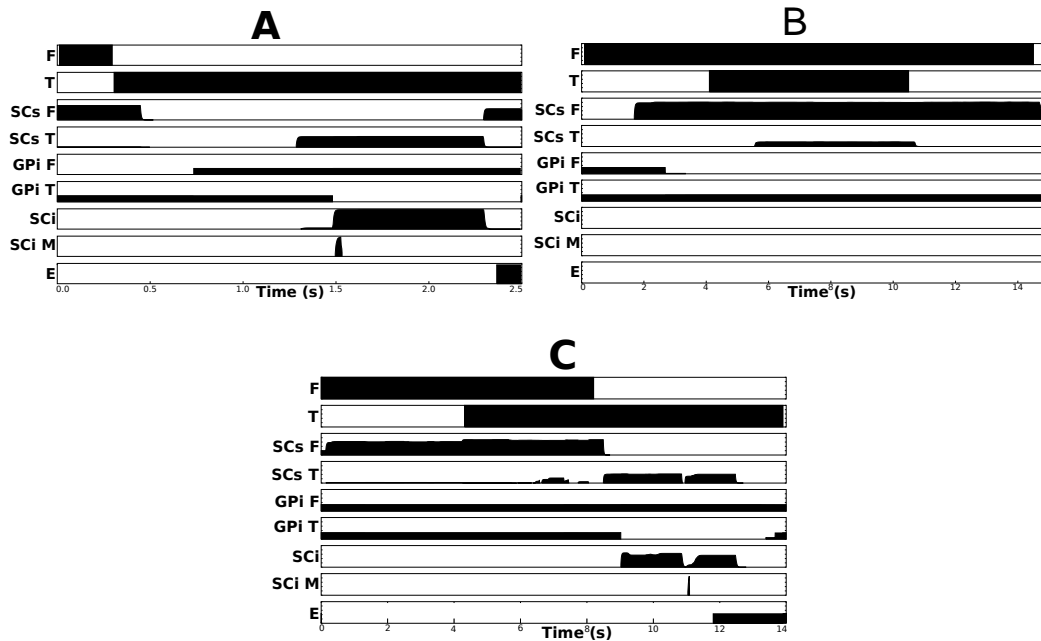


FIGURE 4.19 – (A) Tâche de saccade. (B) Tâche de fixation. (C) Tâche de chevauchement. Activité du système, en F : indice de fixation. T : cible. SCs F : Neurone de la couche SCs au centre du champ de vision. SCs T : Neurone de la couche SCs à la position de la cible. GPi F : Neurone du GPi correspondant à SCs F. GPi T : Neurone du GPi correspondant à SCs T. SCi : Neurone de SCi correspondant à SCs T. SCi M : SCi de la couche motrice correspondant à SCi. E : position de l’œil.

4.6.2 Comportements complexes

Puisque le système se comporte correctement dans les tâches simples, il est maintenant possible de le tester dans des tâches plus complexes.

Il a été montré précédemment que le modèle est composé de 2 boucles séparées, la boucle STBS traitant les informations spatiales et la boucle CBTC traitant les informations non-spatiales. Les 2 boucles étant dotées de capacités d’apprentissage indépendantes, il devrait être possible d’apprendre à associer une position ou une couleur spécifique à une récompense.

Apprentissage spatial : Dans cette tâche, la procédure expérimentale se compose d’un écran noir (2,5 s), d’une étape de fixation (4 s) durant laquelle un indice (carré rouge) apparaît au centre de l’écran jusqu’à ce que le robot le fixe. Puis l’indice de fixation disparaît et 2 cibles apparaissent (2 disques de couleurs différentes, une cible et un distracteur) pendant 6 s maximum jusqu’à ce qu’une saccade soit effectuée. Puis la procédure recommence avec l’écran noir et ainsi de suite. Une récompense positive est distribuée si une saccade vers la position désirée est effectuée (toujours à droite ou toujours à gauche) et une récompense négative si une saccade vers la mauvaise position est effectuée. Les saccades moyennes ne sont

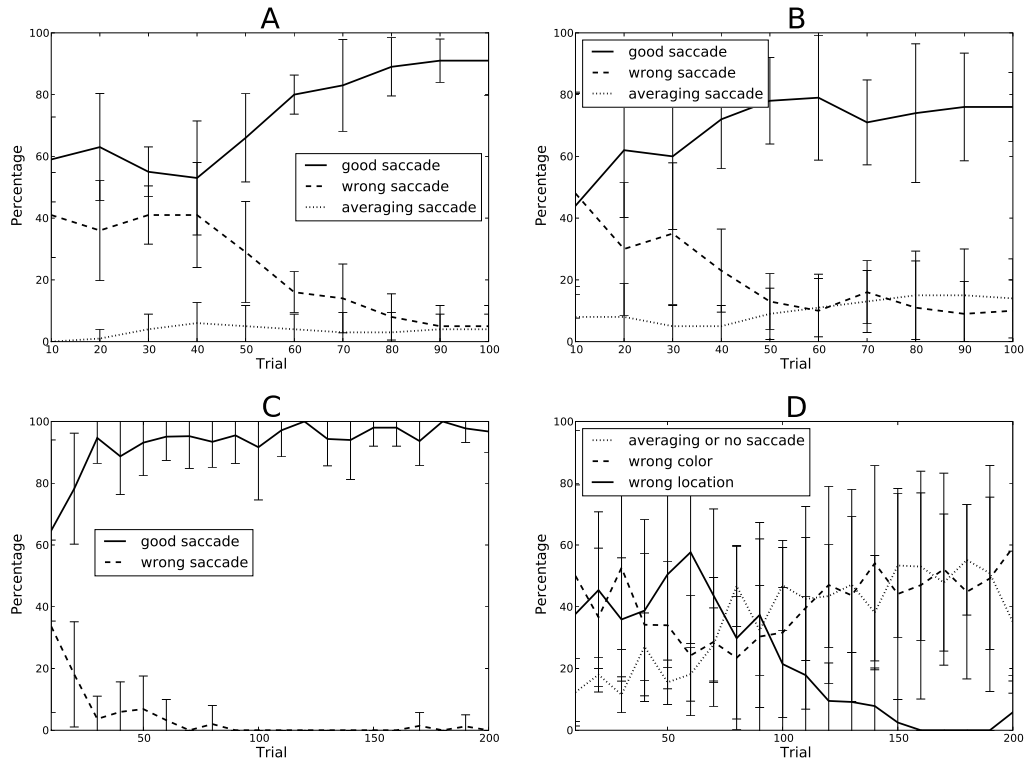


FIGURE 4.20 – A : Résultats de la tâche « spatiale ». B : Résultats de la tâche « couleur ». C : Performances de la tâche « spatiale/couleur ». D : Détails sur les types d’erreurs dans la tâche « spatiale/couleur » dans les cas négatifs.

pas récompensées. Une saccade moyenne apparaît lorsque les deux cibles sont sélectionnées simultanément, ce qui provoque une saccade vers le centre de gravité des deux cibles. Ce comportement, apparemment inadéquat, est cependant observé aussi chez l’animal [Coren and Hoenig, 1972, Findlay, 1982, van Opstal and van Gisbergen, 1990]. La couleur des cibles est alternée aléatoirement (bleu ou vert) entre chaque essai.

La figure 4.20A montre les résultats moyens obtenus après 10 séries de 100 essais chacune. On peut voir que l’apprentissage commence à biaiser correctement le comportement aux alentours du 50^{ième} essai, et se stabilise avec une performance moyenne de 80 %. On peut également remarquer que le comportement appris ne bloque pas complètement les autres comportements. Un faible niveau de mauvaises saccades et de saccades moyennes subsiste quand même, ce qui est largement dû à la variabilité dans la perception.

Apprentissage non-spatial : Dans cette tâche, la procédure expérimentale reste la même mais, cette fois, on récompense les saccades en fonction de la couleur de la cible (toujours vert ou toujours bleu). Les deux cibles alternent toujours aléatoirement entre chaque essai.

Ici encore, le système apprend correctement le comportement désiré de manière assez similaire à l'apprentissage spatial (cf. fig. 4.20B). Cependant, la performance moyenne est légèrement plus faible et la variabilité plus élevée. Ce phénomène peut être expliqué par la compétition entre l'apprentissage spatial et l'apprentissage non-spatial. Le comportement observé montre que l'apprentissage spatial semble avoir un plus fort impact sur le comportement. Le fait d'avoir la cible de la bonne couleur apparaissant consécutivement au même endroit semble déclencher un apprentissage spatial qui dégrade la performance. En effet, comme la carte fusionnée est influencée par la boucle CTBC et se projette ensuite sur la boucle SBTS, l'apprentissage spatial a, en quelque sorte, le « dernier mot » et est donc plus impliqué dans le comportement.

Combinaison d'apprentissage spatial et non-spatial : Ici sont combinées les 2 précédentes tâches en récompensant seulement une couleur spécifique à une position spécifique. Cette tâche comporte donc 2 possibilités :

Le cas « positif », dans lequel la cible de la bonne couleur, est au bon endroit. Dans ce cas, une bonne saccade est possible et est récompensée. Les mauvaises saccades sont donc ici dirigées vers la mauvaise couleur et le mauvais endroit (récompense négative).

Le cas « négatif », dans lequel la bonne cible, de la bonne couleur, est au mauvais endroit. Dans ce cas, une bonne saccade n'est pas possible et l'on cherche à apprendre à ne pas bouger ou à faire une saccade moyenne (récompense positive). Dans le cas « négatif », les mauvaises saccades possibles sont soit au bon endroit – mais vers la mauvaise couleur - soit vers la bonne couleur – mais au mauvais endroit (récompense négative).

Cette expérience semble plus difficile puisque, dans ce cas, l'apprentissage spatial et l'apprentissage non-spatial sont en compétition. Cependant, les performances de bonnes saccades dans le cas « positif » croît rapidement vers 95 % et, après 100 essais, les mauvaises saccades n'apparaissent presque plus (cf. fig. 4.20C). Donc, ici, la difficulté semble plus d'apprendre à ne pas faire de saccade dans le cas « négatif ». Le taux de comportement correct dans ce cas (pas de saccade ou saccade moyenne) n'excède pas 50 % (cf. fig. 4.20D) . La figure 4.20D montre le détail du type d'erreur dans le cas « négatif ». Après 100 essais, le nombre des saccades vers le mauvais emplacement tend vers zéro. Ainsi, à la fin de l'apprentissage, la plupart des erreurs sont des saccades vers le bon emplacement, mais lorsque la mauvaise couleur apparaît. Ce résultat est en accord avec celui de la tâche d'apprentissage non-spatial où une dominance de la boucle spatiale (SBTS) a été observée.

4.7 Discussion

Le modèle proposé ici intègre le colliculus supérieur et les ganglions de la base sur la base de modèles récents [Tabareau et al., 2007, Girard et al., 2008]. Ce modèle est le premier à ce niveau de modélisation à intégrer le circuit saccadique sur un

robot avec à la fois une sélection sous-corticale de l'information spatiale (dans le boucle STBS), une sélection corticale des caractéristiques non-spatiales (dans la boucle CBTC) et des capacités d'apprentissage.

Les capacités de ce modèle en matière de sélection de cibles dans des paradigmes expérimentaux classiques ont été étudiées. Les résultats obtenus prouvent que ce modèle est efficace alors qu'il est purement réactif, c'est-à-dire qu'il ne contient aucune mémoire de travail, ni de structure permettant des saccades volontaires (comme le FEF).

Comparaison avec l'état de l'art Le modèle fondateur de Dominey et Arbib [Dominey and Arbib, 1992, Dominey et al., 1995, Dominey, 1995] possède des capacités de mémoire et d'apprentissage de séquences non répliquées dans le modèle simple présenté ici : il est, de ce point de vue, plus complet. Cependant, notre contribution l'améliore sur au moins deux aspects.

Premièrement, alors que Dominey et Arbib intègrent un modèle de ganglions de la base seulement inclus dans des boucles corticales, notre modèle prend en compte la boucle STBS maintenant clairement identifiée, laquelle peut réagir plus vite que les circuits corticaux.

Deuxièmement, leur modèle de ganglions de la base est relativement simpliste. En effet, il est basé sur l'ancienne distinction des voies directe et indirecte de la connectivité des BG [Albin et al., 1995] – ne prenant en compte qu'une partie de son organisation [Redgrave, 2007]), à propos de laquelle ils n'ont gardé que la voie directe (du striatum vers la *substantia nigra pars reticulata*). En conséquence, les cibles présentées simultanément n'interagissent pas dans les circuit des BG, empêchant ainsi la résolution des conflits. Leur couche motrice du SC nécessite donc un mécanisme de type *winner-takes-all* ad hoc. Notre modèle de ganglions de la base, basé sur des données neuro-anatomiques plus récentes (c'est-à-dire incluant la plupart des connexions connues dans les BG), est capable de résoudre ces conflits.

Plus récemment, Brown et al. (2004) ont proposé un modèle incluant une boucle CBTC dédiée à la sélection de la « stratégie saccadique » (permettant de sélectionner sur quels critères une saccade doit être déclenchée) et une boucle STBS dédiée à la sélection de la cible. Ici encore, ce modèle contient un mécanisme de mémoire de travail absent de notre modèle simple. Leurs « stratégies saccadiques » spécifient si une saccade doit être basée sur l'indice de fixation, la position de la cible ou les caractéristiques de la cible. Nous avons montré qu'une telle stratégie « explicite » n'est pas nécessaire pour les tâches basiques qu'ils ont testées et implémentées. Notre circuit cortical de sélection de caractéristique modulant le circuit de sélection spatiale sous-cortical est suffisant pour reproduire de tels comportements. De plus, leur boucle STBS ne fonctionne pas d'elle-même puisqu'elle est strictement dirigée par des entrées corticales, alors que notre système « décortiqué » est encore capable d'apprendre et de générer des saccades basées sur la position ou la fixation. Les détails de leurs circuits des BG souffrent également

de quelques limitations discutées plus précisément dans [Girard and Berthoz, 2005].

Finalement, Chambers et al. (2005) ont proposé un modèle intégrant les circuits corticaux et sous-corticaux, où un seul modèle de BG dédié à la sélection spatiale intègre les entrées du FEF et du SC. En utilisant différentes boucles de contre-réaction positives de ce circuit, ils ont montré que la manipulation du niveau de dopamine dans leur modèle de BG génère des modifications des temps de réactions et des tailles de saccades rappelant le comportement des patients atteints de la maladie de Parkinson. Malheureusement, leur modèle repose sur un seul module thalamique, recevant à la fois les entrées du SC et du FEF, alors qu'il est clairement établi que les boucles CBTC passent pas les noyaux ventraux antérieurs et ventraux latéraux et que les boucles STBS passent par le pulvinar et les noyaux intralaminaires.

Système visuel Nous avons décidé ici de limiter la vision aux objets colorés, notre système visuel artificiel fournissant alors les positions et couleurs des objets apparaissant à l'écran dans les expériences menées. Il faut noter qu'un tel choix de filtrage dans l'entrée visuelle ne constitue pas une limite du modèle. En effet, celui-ci reçoit ces informations et les retransforme ensuite en activités neuronales dans des cartes. Il serait tout à fait possible de fournir plus d'informations en entrée de ce modèle, comme par exemple directement l'image « brute » décomposée en luminance (pour la projection directe rétine-SC) et en couleurs, bords, etc (pour les entrées corticales). Une telle entrée brute aurait provoqué le même comportement dans les tâches décrites ici puisque celles-ci ne se composent que de disques colorés sur fond noir. En revanche, le problème se pose dans un environnement plus naturel. Dans ce cas, la perception des seuls objets colorés pourrait s'avérer insuffisante. Il serait alors nécessaire de « raffiner » le système visuel en l'étendant à la luminance, aux bords orientés et aux mouvements, par exemple, et de chercher à se rapprocher le plus possible du système visuel naturel. Un tel système devrait cependant respecter la contrainte computationnelle du calcul temps-réel (permettant au robot de véritablement « réagir » aux événements inattendus). Cette contrainte limiterait sans doute la définition de l'image d'entrée ainsi que le débit en images par seconde du résultat. De même, l'utilisation du processeur BIPS permet de s'affranchir des calculs nécessaires à l'extraction des caractéristiques mais la précision de ses résultats est limitée par le nombre de cellules disponibles.

Notons également que de récentes recherches indiquent que le SC encoderait, non pas strictement les informations visuelles « brutes », mais plutôt les positions d'éventuelles cibles pertinentes [Hafed and Krauzlis, 2008]. Il semble donc que les informations visuelles représentées au niveau du SC subissent bien une sorte de filtrage. Notre système ne ferait alors que limiter l'éventail des cibles possibles.

Dominance spatiale Les résultats obtenus montrent également que l'apprentissage spatial semble dominant par rapport à l'apprentissage non-spatial. En effet, la sélection spatiale a lieu après la modulation non-spatiale. Ainsi, une cible de

la bonne couleur par exemple, apparaissant plusieurs fois au même endroit, sera d'autant plus renforcée spatialement qu'elle aura été amplifiée par sa « bonne couleur » (dans la boucle non spatiale). La cible suivante apparaissant à cet endroit sera donc fortement favorisée, même si elle est de la mauvaise couleur et donc de plus faible saillance (par la modulation de la boucle corticale). On peut voir sur la figure 4.11 que l'apprentissage spatial apparaît à un niveau plus bas, c'est-à-dire plus près de la couche motrice de sortie, et donc a le « dernier mot » sur la sélection. Même si cette propriété devrait pouvoir être ajustée par des réglages appropriés des poids de projection, la question se pose de savoir si les animaux apprennent plus facilement une récompense spatiale plutôt qu'une non-spatiale, ce qui semble être une prédiction de notre modèle.

Saccades « volontaires » Dans la mesure où notre modèle générateur de saccades est composé principalement du SC, sans aucune autre structure capable de provoquer une saccade, il s'avère être uniquement réflexe – c'est-à-dire qu'il ne permet de générer que des saccades déclenchées par des événements extérieurs. Il ne peut donc pas générer de mouvements « volontaires » – c'est à dire dirigés vers un « but », que celui-ci soit visible (saccade intentionnelle), qu'il ait été visible (saccade guidée par la mémoire) ou qu'il ne soit pas encore visible (saccade prédictive) [Pierrot-Deseilligny et al., 1995].

La génération de saccades « volontaires » implique d'autres structures corticales absentes de notre modèle, comme le FEF en interaction avec le cortex pariétal (PPC) ou le cortex préfrontal dorso-latéral (DLPFC) pour les saccades guidées par la mémoire par exemple [Pierrot-deseilligny et al., 2004].

Il existe quelques modèles récents permettant de générer des saccades volontaires et incluant le FEF avec mémoire de travail (par exemple [Mitchell and Zipser, 2001, Mitchell and Zipser, 2003, Heinzle et al., 2007, Fix, 2007, Hazy et al., 2007, Fix et al., 2008]). Ces modèles ne comportent pas les mécanismes que nous proposons et, en ce sens, sont complémentaires du nôtre. L'extension de notre modèle à des structures permettant un contrôle plus volontaire des saccades fera l'objet de travaux futurs.

Vergence et poursuite Le modèle de SC présenté ici génère des saccades « conjuguées », c'est-à-dire avec des commandes identiques pour chaque œil. Ce principe de vision « cyclopéenne » (loi de Hering [Hering, 1868]) fonctionne très bien pour la génération de saccades, mais pose certains problèmes pour les mouvements de vergence [Enright, 1984, Zhou and King, 1998], remettant ainsi un peu en avant la théorie de von Helmholtz qui pensait que les yeux étaient commandés indépendamment. La vision traditionnelle du SC est qu'il est impliqué dans la génération de saccades, mais pas dans la génération des mouvements de vergence [Wurtz, 1996]. Cette conception n'est peut être pas complètement correcte dans la mesure où des informations de disparité ont été mesurées dans les couches visuelles superficielles du chat [Bacon et al., 1998] et de l'opossum [Dias et al., 1991]. De plus, la région LIP connue pour encoder les directions et distances des cibles visuelles

[Gnadt and Mays, 1995] se projette, entre autres, sur le SC [Gnadt and Beyer, 1998]. La possibilité d'une implication du SC dans les mouvements de vergence (ou du moins dans les mouvements combinant saccades et vergences) est une question en suspens, peu de données biologiques existent, ni de modèles récents dans ce domaine.

De même, les mouvements de poursuite ont été traditionnellement attribués à des structures corticales comme le FEF se projetant directement sur les noyaux moteurs (pour une revue voir [Krauzlis, 2004]). Cependant, certains résultats semblent indiquer que les mouvements de poursuite sont probablement dûs à une interaction entre le FEF et le SC [Gardner and Lisberger, 2002], ouvrant ici encore la voie à une intégration de ces deux structures.

L'extension de notre modèle à ces autres mouvements fera l'objet de travaux futurs.

Apprentissage dans les BG : algorithme L'algorithme d'apprentissage basique utilisé ici s'est montré suffisant lorsque le système a besoin d'apprendre des associations sensorimotrices simples, avec des stimuli facilement reconnaissables, et sans qu'il y ait besoin de longues séquences comportementales menant à la récompense. Naturellement, afin de faire face à des situations plus complexes, cet algorithme devrait être amélioré en utilisant des systèmes plus puissants incluant par exemple des experts multiples comme dans [Khamassi et al., 2005].

De plus, notre algorithme utilise la sortie inhibitrice du GPi afin de calculer les poids à mettre à jour. Cette solution, uniquement « interne » aux BG, ne tient pas compte de la cible effectivement sélectionnée au niveau du SC. De récents travaux montrent l'existence de connexions tecto-nigrales qui pourraient servir de *feedback* pour l'apprentissage par renforcement [May et al., 2010]. Même si ces connexions semblent trop diffuses pour transmettre des informations spatiales précises, cette voie mérite d'être étudié pour l'amélioration du système.

Enfin, contrairement aux précédents travaux, notre modèle ne contient pas explicitement de module d'exploration. En effet, au commencement de la tâche d'apprentissage, il n'existe pas de biais entre les cibles et donc des saccades moyennes devraient systématiquement être déclenchées. Cependant le bruit inhérent au « monde réel » provoque de temps à autre des variations de délais dans la détection des cibles ou bien des variations dans la perception de la couleur. L'exploration explicite, qui peut être vue comme du bruit dans la sélection, est remplacée par une exploration implicite, en exploitant le bruit dans l'environnement. Il apparaît donc ici que l'implémentation robotique permet de résoudre naturellement le problème de l'exploration et qu'elle s'accommode d'un modèle plus parcimonieux. Cette solution s'est montrée suffisante pour résoudre les tâches considérées. Elle ne le sera sans doute plus dans des tâches plus complexes nécessitant, pas exemple, une mémoire de travail. On notera cependant à ce propos que le problème de l'exploration dans les

modèles « acteur-critique » de BG n'est pas trivial et que peu de travaux permettent de modéliser ce comportement de manière neuronale (voir par exemple [Joel et al., 2002, Sridharan et al., 2006]).

Apprentissage dans les BG : anatomie De notre modèle de BG, le striatum et le noyau sub-thalamique prennent tous les deux les mêmes entrées bien qu'anatomiquement séparés. Ainsi l'apprentissage s'applique aux entrées de ces deux structures de la même manière. Ces deux structures font partie de l'ancienne interprétation des voies directes – des neurones dopaminergiques de type D1 du striatum vers les noyaux en sortie – et indirectes – des neurones dopaminergiques de type D2 du striatum vers les noyaux en sortie, via GPe et STN. Il serait donc tout à fait plausible que l'apprentissage ne s'applique pas de la même manière à ces deux structures. L'investigation de cette hypothèse doit faire l'objet de travaux supplémentaires.

De plus, pour des raisons computationnelles, nous avons décidé de séparer les apprentissages des boucles STBS et CBTC. Cette solution s'est montrée efficace, même si ce modèle manque clairement d'une boucle corticale de sélection spatiale, impliquant le FEF, ce qui pourrait permettre un contrôle cognitif au dessus du modèle réactif et pourrait probablement affecter la prédominance spatiale observée. Ici encore, nos résultats suggèrent de recherches supplémentaires.

Intégration multi-sensorielle

Sommaire

5.1	Introduction	91
5.2	Biologie	94
5.2.1	Structures corticales	94
5.2.2	Structures sous-corticales	97
5.3	État de l'art	98
5.4	Généralisation du modèle de génération de saccades	102
5.4.1	Modèle multi-sensoriel	102
5.4.2	Orientation	107
5.5	Expériences	108
5.5.1	Amélioration multi-sensorielle	108
5.5.2	Comportement	113
5.6	Discussion	118

5.1 Introduction

Les sens ont été traditionnellement étudiés isolément, alors que la perception est par nature multi-sensorielle. En conséquence, on sait très peu de choses sur le fonctionnement de l'intégration multi-sensorielle. Heureusement, depuis quelques années, un regain d'intérêt pour ce domaine a conduit à des progrès dans notre compréhension des phénomènes qui le caractérisent.

L'intégration multi-sensorielle est la capacité à combiner les informations provenant de différentes modalités sensorielles afin d'obtenir une meilleure représentation de l'environnement. Fusionner ainsi des informations provenant de sources différentes présente deux intérêts majeurs : maximiser l'information pour les modalités non-redondantes et augmenter la fiabilité pour les modalités redondantes [Ernst, 2004].

Des expériences psychologiques bien connues ont mis en exergue certains phénomènes permettant de comprendre un peu mieux cette intégration et d'en cerner les limites.

L'illusion du ventriloque [Howard and Templeton, 1966], que chacun a probablement déjà expérimentée sous une variante ou une autre, est l'impression qu'un son provient du mauvais endroit. Dans le cas du ventriloque, cette illusion est principalement provoquée par la vision du mouvement des lèvres de la marionnette, alors

que le ventriloque ne bouge pas les siennes. La correspondance des mouvements de la marionnette (toujours très amplifiés afin de provoquer un plus grand contraste avec le ventriloque et attirer notre attention) avec les sons de la voix du ventriloque (toujours déformée afin d'être clairement différente de sa voix « naturelle ») nous suggère que ces sons proviennent bien de la marionnette et non du ventriloque. Cette illusion est provoquée principalement par la dominance de la vision sur l'audition. En effet, la localisation visuelle étant plus précise que la localisation auditive, lorsque les deux stimuli apparaissent simultanément, la superposition du stimulus auditif (représentant une zone relativement floue) et visuel (une zone précise) nous suggère que ces deux stimuli proviennent probablement du même endroit : la marionnette.

L'*illusion du double flash* [Shams et al., 2000] est un peu à l'opposé de celle du ventriloque. Ici l'illusion de la perception de deux flashes lumineux est induite par l'audition de deux brefs bips auditifs pendant la vision d'un seul flash. Dans ce cas, l'illusion est provoquée par la dominance de l'audition dans la perception des événements temporels, laquelle est plus précise que pour la vision. La superposition du stimulus visuel temporellement flou avec deux stimuli auditifs temporellement très précis et rapprochés nous suggère qu'il y a probablement eu simultanéité des événements et, donc, deux flashes et deux bips.

L'*effet McGurk* [McGurk and MacDonald, 1976] montre que les illusions d'intégration multi-sensorielles ne sont pas seulement spatiales ou temporelles mais peuvent également influencer les « caractéristiques » des stimuli perçus. Si l'on combine les mouvements des lèvres d'une personne prononçant le phonème « ga » avec le son du phonème « ba », nous avons l'illusion de percevoir le phonème « da ». Ici c'est la combinaison de l'ambiguïté visuelle (les mouvements des lèvres pour les phonèmes « ga » et « da » sont très proches) et de l'ambiguïté auditive (les sons des phonèmes « ba » et « da » sont très proches) qui provoque finalement la perception du phonème le plus probable : « da ».

Comprendre et expliquer ces phénomènes d'illusion est donc une façon de comprendre le fonctionnement de l'intégration multi-sensorielle. En particulier, Pouget et al. (2002) ont identifié trois sous-problèmes inhérents à l'intégration multi-sensorielle.

Le problème de la mise en correspondance, exprime le fait que l'on cherche à regrouper les informations concernant un même objet. Cette tâche n'est pas triviale puisque les différentes modalités répondent en même temps à plusieurs objets. C'est, par exemple, le cas si l'on cherche à comprendre les mots prononcés par un interlocuteur au milieu d'un groupe, alors que notre vision nous indique une foule et notre audition plusieurs conversations en même temps.

Le problème du ré-encodage exprime le fait que les différentes modalités encodent les informations dans des formats différents. Il est donc nécessaire de trouver un référentiel commun lorsqu'il s'agit, par exemple, de comprendre une conversation en utilisant la vision – qui nous donne des informations sur les mouvements des lèvres de notre interlocuteur – et l'audition – qui nous donne des informations sur les fréquences sonores.

Enfin le problème de l'inférence statistique exprime le fait que les informations

des différents sens n'ont pas toutes la même fiabilité en même temps. Il faut donc pouvoir ajuster les poids relatifs des différentes informations sensorielles en fonction de leur contexte. Par exemple, la vision est plus utile pour comprendre une conversation en plein jour que dans le noir.

La biologie ne donne pas réellement de réponse claire au problème de l'intégration multi-sensorielle. En effet il apparaît qu'il n'existe pas de structure dédiée à cette tâche [Avillac et al., 2005] et que cette fonction est plutôt décentralisée. On retrouve des informations multi-sensorielles dans le colliculus supérieur, l'aire intra pariétale latérale, l'aire intra pariétale ventrale... [Ghazanfar and Schroeder, 2006].

Le colliculus supérieur est une zone du tronc cérébral bien connue pour son implication dans les mouvements de saccades oculaires (cf. Chapitre 4). Cependant le SC est également, chez la plupart des vertébrés, le premier centre d'intégration multi-sensorielle [Holmes and Spence, 2005]. En effet, si les neurones des couches superficielles du SC (SCs) répondent principalement aux stimulations visuelles [Hoffmann, 1972, Beckstead and Frankfurter, 1983, Girman and Lund, 2007], la plupart des neurones des couches plus profondes répondent également aux combinaisons de stimulations visuelles, tactiles, auditives, ainsi qu'aux infrarouges et aux champs électriques chez les animaux qui y sont sensibles [Stein et al., 1975, Hartline et al., 1978, Knudsen, 1982, Meredith and Stein, 1983, King and Palmer, 1985, Bodznick, 2005].

Depuis les travaux pionniers de Stein et Meredith (1993), l'étude de l'intégration multi-sensorielle dans le SC a permis d'en extraire quelques règles simples de fonctionnement.

La *règle spatiale (spatial rule)* est la conséquence de l'alignement des cartes de représentations spatiales des différentes modalités encodées dans le SC. Lorsque des stimuli provenant de différentes modalités apparaissent dans la même zone, l'activité résultante est amplifiée. On remarquera cependant que cet alignement n'est pas toujours parfait puisque les différentes modalités n'utilisent pas toutes le même référentiel, ce qui entraîne la nécessité d'un réalignement, lui même imparfait [Pouget et al., 2002]. C'est peut-être également une des raisons expliquant la grande taille des champs récepteurs que l'on retrouve dans le SC. Les informations visuelles sont encodées dans un référentiel rétino-centré ; les informations auditives sont encodées dans un référentiel cranio-centré (entre les deux oreilles) ; les informations somatotopiques représentent le corps tout entier.

La *règle temporelle (temporal rule)*, un peu liée à la précédente, est la conséquence du fait que des stimuli provenant de différentes modalités arrivant au même moment (et au même endroit), sont probablement provoqués par le même événement et donc entraînent une amplification. Encore une fois, cette concordance temporelle n'est pas parfaite puisque les informations provenant de différentes modalités, passant par des chemins neuronaux différents et plus ou moins longs, n'arrivent pas forcément au niveau du SC au même moment. Ainsi cet effet apparaît dans une certaine fenêtre de temps [Meredith et al., 1987].

La *règle de l'amélioration multi-sensorielle (multi-sensory enhancement)*, liée aux deux précédentes, est relative au phénomène d'amplification. L'activité résultant

d'une stimulation multi-sensorielle est sur-additive, c'est-à-dire qu'elle est supérieure à la somme des activités provoquées par chaque modalité indépendamment et cet effet est d'autant plus fort que les stimuli sont faibles (c'est le principe d'efficacité inverse, *inverse effectiveness rule*). Ce phénomène peut être reproduit relativement simplement en utilisant des neurones dont la fonction de transfert n'est pas linéaire (par exemple une fonction sigmoïde) [Martin et al., 2009].

Les travaux pionniers ont permis de découvrir des convergences multi-sensorielles au niveau cortical dans des régions pariétales, temporales et frontales [Benevento et al., 1977, Hyvarinen and Shelepin, 1979, Bruce et al., 1981, Rizzolatti et al., 1981, Duhamel et al., 1998] ainsi qu'au niveau de différents noyaux sous-corticaux [Gordon, 1973, Olson and Graybiel, 1980, Meredith and Stein, 1986]. Ainsi se trouvait confirmée l'idée que l'intégration multi-sensorielle a lieu au niveau des zones associatives de haut niveau du cortex projetant ensuite vers les noyaux sous-corticaux responsables du déclenchement de certaines actions [Stein and Meredith, 1993]. Cette idée sous-entendait l'hypothèse d'*intégration tardive (late integration)* selon laquelle les différentes modalités sont d'abord traitées selon leurs chemins hiérarchiques unimodaux respectifs avant d'être intégrées [Felleman et al., 1991].

Cependant, de plus récents résultats indiquent que des interactions multimodales existent également au niveau des zones sensorielles primaires traditionnellement unimodales (voir par exemple les revues [Calvert, 2001, Foxe and Schroeder, 2005, Schroeder and Foxe, 2005, Macaluso and Driver, 2005]). Même s'il y a débat sur le fait que certaines de ces interactions sont influencées par un *feedback* des zones associatives de haut niveau (*top-down*) [Macaluso, 2000, Ghazanfar et al., 2005, Macaluso and Driver, 2005], il apparaît aujourd'hui clairement qu'il existe bien des interactions multimodales au niveau des cortex sensoriels « primaires » de manière *feed-forward*, ce qui semble soutenir l'idée d'une intégration précoce (*early integration*) (voir [Foxe and Schroeder, 2005] par exemple pour une revue succincte). Ainsi l'idée que le néo-cortex pourrait être essentiellement multimodal émerge de plus en plus [Ghazanfar and Schroeder, 2006].

Dans la suite de ce chapitre nous faisons un bref survol des données biologiques concernant l'intégration multi-sensorielle, puis nous décrivons un modèle permettant d'en expliquer et d'en reproduire certains phénomènes. Le comportement produit par ce système sera ensuite évalué dans plusieurs tâches sur la plateforme robotique mobile Psikharpax.

5.2 Biologie

5.2.1 Structures corticales

Comme indiqué précédemment, il existe de nombreuses zones qualifiées de multimodales, ou hétéromodales dans le cas des zones associatives de haut niveau (cf. figure 5.1, pour une revue, voir [Ghazanfar and Schroeder, 2006]).

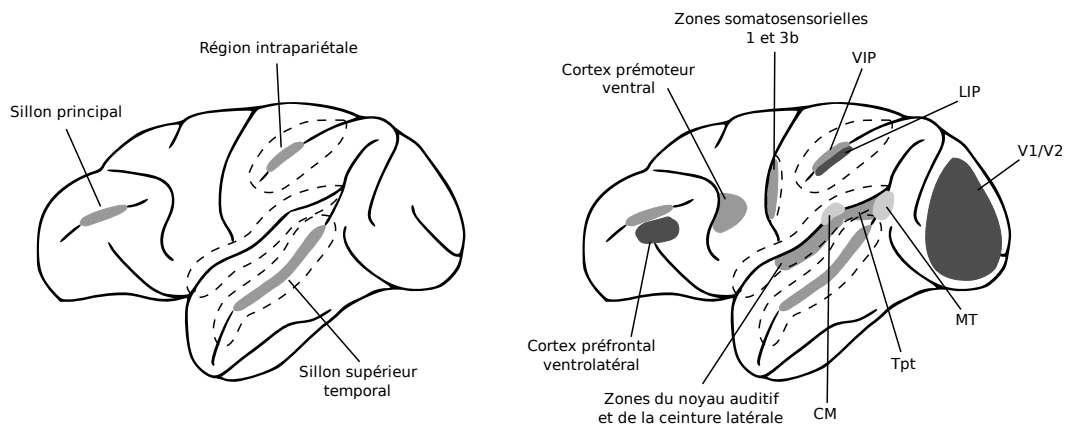


FIGURE 5.1 – À gauche, vision « traditionnelle » de l’anatomie du cortex multi-sensoriel chez le primate au niveau des zones du cortex associatif . À droite, vision moderne des zones corticales multi-sensorielles. En gris foncé, les zones d’intégration visuelles et auditives, en gris clair les zones d’intégration auditives et somatosensorielles. En gris moyen, les zones répondants à la vision, à l’audition et au tactile. Adapté de [Ghazanfar and Schroeder, 2006].

5.2.1.1 Cortex associatif

Sillon temporal supérieur Le sillon temporal supérieur (STS) forme une région assez étendue du cortex contenant probablement plusieurs régions fonctionnelles différentes. Un certain nombre de régions du STS ont montré des propriétés multi-modales chez l’homme et le macaque en réponse à des stimuli « simples » (textures en mouvement) mais, surtout, à des stimuli « sémantiques » de plus haut niveau comme ceux qu’implique la reconnaissance de la parole [Wright et al., 2003], de lettres [van Atteveldt et al., 2004], d’animaux ou d’outils [Beauchamp et al., 2004] – par l’audition et la vision. Bien que moins explorées, des interaction visuo-tactiles ont également été mises en évidence dans la reconnaissance de formes [Amedi et al., 2001]. Pour une revue voir [Beauchamp, 2005].

Sillon intrapariétal et zone Temporo-pariétale La région intrapariétale et plus particulièrement la zone latérale intrapariétale (LIP) reçoit des informations visuelles, auditives et tactiles ainsi que la position des yeux et de la tête. Cette région est impliquée dans la génération de mouvements guidés par des stimuli multi-sensoriels (comme les saccades oculaires) [Andersen et al., 1997]. Les zones ventrales intrapariétales (VIP) ainsi que temporo-pariétales (Tpt) sont également impliquées dans la génération de ce type de mouvement et reçoivent également des informations visuelles, tactiles, auditives et vestibulaires plutôt centrées sur la tête, le cou et les épaules [Duhamel et al., 1998, Bremmer et al., 2002, Avillac et al., 2005, Schlack et al., 2005, Leinonen et al., 1980].

Cortex frontal et préfrontal Les propriétés multimodales du cortex préfrontal ont été relativement peu explorées. Une intégration temporelle des informations visuelles/auditives a quand même été enregistrée chez le macaque [Watanabe, 1992, Fuster et al., 2000], propriété sans doute importante pour la reconnaissance du langage chez l'humain laquelle repose largement sur cette capacité.

Au niveau du cortex prémoteur on retrouve des neurones sensibles aux stimuli visuels, tactiles et auditifs représentant des événements originaires de la zone proche du corps, autour du visage des bras et du torse [Graziano et al., 1994, Fogassi et al., 1996, Graziano et al., 1999]. Cette région multisensorielle particulièrement sensible aux stimuli se rapprochant du sujet (*looming*) [Maier et al., 2004] est très probablement responsable des mouvements défensifs [Schiff et al., 1962, Graziano et al., 2002].

Sillons ectosylvien et suprasylvien latéral (chez le chat) Le sillon ectosylvien antérieur du chat se trouve à la frontière de trois zones sensorielles auditive, visuelle et tactile (respectivement temporale, pariétale et frontale) dont la jonction présente des neurones multisensoriels. Cette zone est connue pour influencer les capacités multimodales des neurones du colliculus supérieur [Wallace and Stein, 1994] ainsi que les comportements d'orientation multimodale engendrés [Jiang et al., 2002].

5.2.1.2 Zones « mono-sensorielles »

Cortex visuel On connaît depuis un certain temps déjà l'existence de réponses auditives au niveau d'un grand nombre de neurones (41 %) du cortex visuel du chat, réponses dont la précision spatiale est très fine [Morrel, 1972]. Des études anatomiques chez le singe montrent également des projections des régions associatives (STS) et auditives (zone du noyau et de la ceinture auditive) vers le cortex visuel primaire (V1) [Falchier et al., 2002, Rockland and Ojima, 2003]. Ces connections de type plutôt *feedback* [Rockland and Ojima, 2003] provenant du cortex auditif semblent se concentrer surtout dans la zone périphérique du champ visuel [Falchier et al., 2002].

Au niveau des zones visuelles de plus haut niveau du cortex inféro-temporal (IT) on retrouve également des influences auditive et somatosensorielle [Pribram et al., 1954, Gibson and Maunsell, 1997, Poremba et al., 2003] suggérant une représentation multimodale des objets dans cette région. Par exemple, il apparaît que, chez l'humain, l'aire fusiforme des visages est activée non seulement à la vue d'un visage familier, mais également à l'écoute d'une voix familière [von Kriegstein et al., 2005]. La perception et la reconnaissance tactile des objets en 3D active également le complexe latéral occipital chez l'humain (IT chez le singe) [Amedi et al., 2001, James et al., 2002, Pietrini et al., 2004]. On observe également, lors de la perception tactile de mouvements, une activation de la zone visuelle V5/MT [Hagen et al., 2002, Blake et al., 2004].

Cortex auditif Au niveau du cortex auditif primaire (A1), des interactions audio-visuelles ont été observées durant des tâches impliquant le langage chez le singe [Ghazanfar et al., 2005] ainsi que chez l’humain [Pekkola et al., 2005, van Atteveldt et al., 2004]. Des interactions audio-visuelles ont aussi été mesurées chez le furet [Bizley et al., 2007]. On trouve également dans A1 des entrées concernant la position des yeux [Werner-Reiss et al., 2003, Fu et al., 2004], ces entrées s’étendant au delà de A1. Dans les régions supérieures du cortex auditif, on retrouve des interactions visuelles (probablement *feedback*) [Schroeder et al., 2001] et tactiles (*feedforward*) [Schroeder and Foxe, 2002]. Par exemple, il a été montré que le cortex auditif était capable de traiter des informations spectrales – qu’elles soient auditives ou tactiles [Yau et al., 2009b].

Cortex somatosensoriel Même si très peu d’études sur ce sujet ont été effectuées, des interactions visuelles et tactiles ont été mesurées au niveau du cortex somatosensoriel chez le singe [Zhou and Fuster, 2000, Zhou and Fuster, 2004] ainsi que chez l’homme [Foxe et al., 2000] dans des tâches de discrimination d’événements visuo-haptiques ou audio-haptiques. De plus des données anatomiques chez le marmouset ont révélé des projections du cortex visuel ainsi que du cortex auditif vers le cortex somatosensoriel [Cappe and Barone, 2005].

5.2.2 Structures sous-corticales

Colliculus supérieur Les propriétés multimodales du colliculus supérieur ont été extrêmement étudiées et ont permis d’établir les trois règles de fonctionnement de l’intégration multimodale évoquées en introduction de ce chapitre (règle spatiale, temporelle et efficacité inverse) [Stein and Meredith, 1993].

La structure et le fonctionnement du SC a été détaillé dans la section 4, cependant on peut ajouter que les neurones des couches profondes du SC sont sensibles, non seulement aux stimuli visuels, mais également aux stimuli auditifs et somatosensoriels, ainsi qu’aux combinaisons de ces trois modalités [Wallace et al., 1996].

Les capacités multimodales des neurones du SC dépendent en fait des nombreuses projections corticales vers celui-ci [Jiang et al., 2001, Stein et al., 2002, Jiang and Stein, 2003], contrairement à ses capacités unimodales [Alvarado et al., 2007]. En plus des connexions « directes » provenant de la rétine pour la vision [Hoffmann, 1972, Beckstead and Frankfurter, 1983], du colliculus inférieur pour l’audition [Zwiers et al., 2004] et du complexe trijumeau pour le toucher (vibrisses) [Cohen et al., 2008], le SC reçoit également de nombreuses entrées corticales dont des connexions provenant de régions associatives multimodales. Il est d’ailleurs intéressant de noter que les entrées provenant des régions multimodales impliquent exclusivement les neurones unimodaux [Wallace et al., 1993]. Les propriétés multimodales du SC ne sont donc pas le simple reflet de celles des régions corticales s’y projetant, mais au contraire l’indication d’une véritable convergence multi-sensorielle [Wallace et al., 1993, Wallace and Stein, 1994, Jiang et al., 2001].

De plus, il semble que les champs récepteurs de ces neurones aient la capacité de

se décaler d'une manière permettant de conserver l'alignement entre les différents référentiels correspondants [Jay and Sparks, 1984, Jay and Sparks, 1987a, Jay and Sparks, 1987b]. En effet la plupart des mammifères possèdent des organes sensoriels mobiles (yeux, oreilles...) dont les référentiels peuvent être différents (l'audition est crano-centrée par exemple). L'espace représenté dans le SC étant rétinocentré [Klier et al., 2001], il est donc nécessaire de réaligner ces cartes lors de mouvements des yeux ou des oreilles.

Ganglions de la base Les ganglions de la base exhibent également des propriétés d'intégration de stimuli visuels, auditifs et tactiles [Chudler et al., 1995, Nagy et al., 2006]. Ces propriétés ne sont pas surprenantes dans la mesure où les BG forment une structure centrale recevant des connexions de beaucoup de régions corticales et également des SC.

Thalamus Le thalamus, du fait de sa position de relais sensoriel central, est idéalement placé pour posséder des capacités d'interaction multimodales [Benedek et al., 1997, Matsumoto et al., 2001, Komura et al., 2005].

Amygdale L'amygdale est un petit noyau du système limbique responsable des valences émotionnelles – notamment de la peur – associées aux stimuli sensoriels. Cette structure possède également des capacités de réponses multimodales [Nishijo et al., 1988, Romanski et al., 1993].

Clastrum Le claustrum est une petite région relativement mystérieuse, probablement présente chez tous les mammifères, et située entre le putamen (BG) et le cortex insulaire (insula). La fonction exacte de cette structure très uniforme reste inconnue même si Crick et Koch (2005) ont émis l'hypothèse de son implication dans l'émergence de la conscience... En effet, le claustrum est réciproquement très connecté au cortex et semble présenter des propriétés multi-sensorielles [Olson and Graybiel, 1980, Sherk, 1986, Calvert and Thesen, 2004].

5.3 État de l'art

Comme nous l'avons vu, la majorité de nos connaissances sur l'intégration multi-sensorielle chez les animaux provient de l'étude du colliculus supérieur (et même plus particulièrement de celui du chat). Il existe donc un certain nombre de travaux cherchant à comprendre et à modéliser cette structure.

L'approche bayésienne se trouve être un cadre de choix pour l'intégration multi-sensorielle. En effet, cette approche permet une intégration statistiquement optimale [Knill and Richards, 1996], en plus de fournir un cadre formel, et prédit assez bien les comportements d'intégration observés [van Beers et al., 1996, van Beers et al., 1998, van Beers et al., 1999, van Beers et al., 2002, Ernst and Banks, 2002]. Il est

ainsi naturel de tenter d'expliquer l'intégration dans SC au niveau neuronal par cette approche.

A la base de cette approche, il y a l'estimation d'une probabilité à partir d'observations. Si l'on considère une variable aléatoire binaire T – où $T = 1$ si une cible est présente et $T = 0$ si elle est absente –, la probabilité *a priori* que la cible soit présente dans le champ récepteur d'un neurone du SC est $P(T = 1)$. Cette probabilité dépend de l'environnement et des propriétés du champ récepteur. La règle de Bayes permet de modifier cette probabilité en fonction des entrées sensorielles afin d'obtenir une probabilité conditionnelle. Si on considère, par exemple, qu'un neurone calcule la probabilité conditionnelle de présence d'une cible connaissant ses entrées sensorielles (entrées elles même incertaines) et que ce neurone ne prend qu'une entrée visuelle, cette probabilité peut être calculée en utilisant la règle de Bayes unimodale :

$$P(T = 1|V = v) = \frac{P(V = v|T = 1)P(T = 1)}{P(V = v)} \quad (5.1)$$

Dans cette formule, $P(V = v)$ représente la probabilité d'observer l'entrée $V = v$ (que la cible soit présente ou pas), $P(V = v|T = 1)$ la probabilité d'observer l'entrée visuelle $V = v$ sachant que la cible est présente (cette probabilité est appelée la vraisemblance de la présence de la cible) et $P(T = 1|V = v)$ la probabilité conditionnelle appelée probabilité *a posteriori* de présence de la cible. Cette règle peut, bien entendu, être généralisée au cas multimodal.

L'approche bayésienne nécessite donc la connaissance des probabilités *a priori* et des vraisemblances. Se pose alors la question cruciale de la représentation neuronale de ces quantités. Pour une revue de ce problème ainsi que des propositions pour le résoudre voir [Denève and Pouget, 2004, Knill and Pouget, 2004, Ma and Pouget, 2008].

Certains modèles neuromimétiques proposent de reproduire les phénomènes observés dans le SC à partir du cadre bayésien :

Anastasio et al. (2000) modélisent le phénomène de MSE. En utilisant quelques hypothèses sur l'activité des neurones du SC (l'activité devant être proportionnelle à la probabilité de présence *a posteriori* d'une cible), ils ont pu reproduire le MSE ainsi que l'efficacité inverse. Ce modèle ne tient compte que des neurones du SC, mais n'explique pas la dépendance corticale des propriétés d'intégration.

Patton et Anastasio (2003), de même, montrent qu'il est possible de reproduire le MSE en utilisant une implémentation neuronale de la règle de Bayes. Cette implémentation est basée sur un simple perceptron. Il est, en effet, montré que le phénomène de MSE peut être reproduit par un perceptron grâce aux propriétés non-linéaires de la fonction de transfert des neurones si les activités sont gaussiennes, ou des distributions de Poisson dans le cas d'entrées conditionnellement indépendantes – moyennant certaines hypothèses sur les variances et covariances des distributions des probabilités de vraisemblances. Il est également montré

qu'avec quelques modifications (neurons sigma-pi, c'est-à-dire avec des entrées multiplicatives) ce réseau de neurones peut très bien reproduire la règle bayésienne ainsi que le phénomène de suppression intra-modale (dépression de la réponse lors de la superposition de stimuli de même modalité) – en relâchant les hypothèses sur les vraisemblances. Cependant ce modèle ne prend pas non plus en compte l'importance de la modulation corticale.

Il existe également des modèles n'implémentant pas explicitement la règle de Bayes, mais qui se focalisent plutôt sur les données neuro-anatomiques du SC :

Grossberg et al. (1997) ont développé le premier modèle d'intégration multi-sensorielle dans le SC. Ce modèle incluant des structures corticales comme le PPC et le PFC permet de reproduire des saccades guidées par la mémoire. Les phénomènes de MSE sont ici obtenus par des rétroactions excitatrices entre les neurones à rampe d'activité (dans une carte de diffusion d'activité exclusivement dédiée aux entrées non visuelles) et les neurones à bouffée de décharge (dans une carte de d'activité en pic représentant les activités des entrées strictement visuelles). L'alignement entre les cartes sensorielles étant appris grâce aux entrées de calibration de la carte strictement visuelle. Ce modèle ne permet cependant pas d'expliquer l'influence corticale sur le MSE.

Anastasio et Patton (2003) utilisent un réseau de neurones comprenant une carte auto-organisatrice (SOM). Cette carte représente la couche profonde du SC et est apprise dans une première phase en ne recevant que les informations provenant des connexion « primaire » mono-sensorielles (que l'on peut voir comme sous-corticales). Puis, dans une deuxième phase, des connexions modulatrices (corticales) sont apprises par une règle hebbienne modifiée. En plus de reproduire les phénomènes de MSE, ce modèle permet d'expliquer l'existence de neurones multi et mono-sensoriels dans les couches profondes du SC. Cependant, il ne s'intéresse pas à l'aspect spatial des couches profondes du SC et nécessite une SOM pour chaque neurone de ces couches.

Dans [Magosso et al., 2008, Ursino et al., 2009] est développé un modèle neuronal où des cartes mono-sensorielles (corticales) se projettent sur une carte multi-sensorielle (SC) et reçoivent un *feedback* de cette carte. Contrairement aux précédents, ce modèle permet de prendre en compte l'aspect spatial de l'intégration et reproduit les phénomènes de MSE ainsi que la suppression intra-modale. Cependant, ce modèle ne tient pas compte des connexions « directes » sous-corticales mono-sensorielles.

Martin et al. (2009) proposent un modèle basé sur une SOM tout comme [Anastasio and Patton, 2003], en utilisant une fonction de transfert non linéaire (sigmoïde). Ce modèle, testé sur des vecteurs de données totalement artificielles, est capable de reproduire les comportements de MSE. Ce modèle ne prend pas en compte les données concernant l'influence corticale de l'intégration.

Cuppini et al. (2010) décrivent un modèle de microcircuit du SC utilisant des interneurons inhibiteurs. Ce modèle inclut les connexions primaires et corticales et permet de reproduire tous les principaux phénomènes de l'intégration mesurés au niveau du SC (MSE, efficacité inverse, effet de la désactivation corticale ainsi que les dépression inter- et intra-modales). Cependant, comme les précédents modèles, il n'intègre pas les aspects temporels de l'intégration. De plus, il repose essentiellement sur des phénomènes de compétition impliquant des inter-neurons inhibiteurs, hypothèse neuro-anatomique restant à démontrer. Ce modèle est très similaire à celui décrit dans [Rowland et al., 2007, Alvarado et al., 2008] à la différence que, dans ce dernier, les entrées primaires et corticales se projettent sur une même population d'inter-neurons pour un neurone principal donné.

Tous ces modèles ne se focalisent donc que sur les aspects particuliers du MSE, et ne permettent pas d'en tester les implications sur les comportements d'orientation générés par le SC (à l'exception de [Grossberg et al., 1997]). Il existe, en revanche, encore moins d'implémentations robotiques de systèmes d'intégration multi-sensorielle s'inspirant du fonctionnement du SC :

Ferrell (1996) décrit un modèle capable d'apprendre les alignements entre les cartes sensorielles et la carte motrice par un mécanisme de type SOM dans le but de générer des saccades. Ce système se compose d'une carte visuelle (rétinotopique) représentant le mouvement perçu (différence temporelle entre les images successives), une carte visuo-motrice (rétinotopique) intermédiaire d'alignement et une carte motrice (coordonnées oculomotrices). L'apprentissage des alignements a été testé avec succès dans une tâche consistant à effectuer une saccade vers une cible en mouvement et plusieurs propositions d'extensions futures à la vision binoculaire et à l'audition sont évoquées.

Rucci et al. (1999) proposent un modèle du tectum optique de la chouette. Ce modèle n'incluant que les connexions sous-corticales auditives et visuelles (sans MSE) est capable d'adapter l'alignement entre ces informations et de générer des mouvements d'orientation.

Ravulakollu et al. (2009) décrivent un modèle intégrant des informations visuelles et auditives sur l'axe horizontal. Les informations visuelles encodent le mouvement (différence temporelle) ainsi que l'intensité lumineuse, les informations auditives encodent l'ITD. Les informations sont fusionnées selon un mécanisme ad hoc pour éventuellement déclencher un comportement d'orientation.

Dans le modèle présenté dans [Koene et al., 2007] les activités des cartes de saillances visuelles et auditives sont sommées (sans MSE) et l'inhibition provenant d'un module de SNr simulé (sans modèle de BG) permet d'éviter la sélection d'une cible par un mécanisme de WTA. De futures extensions incluant une influence *top-down* sont proposées.

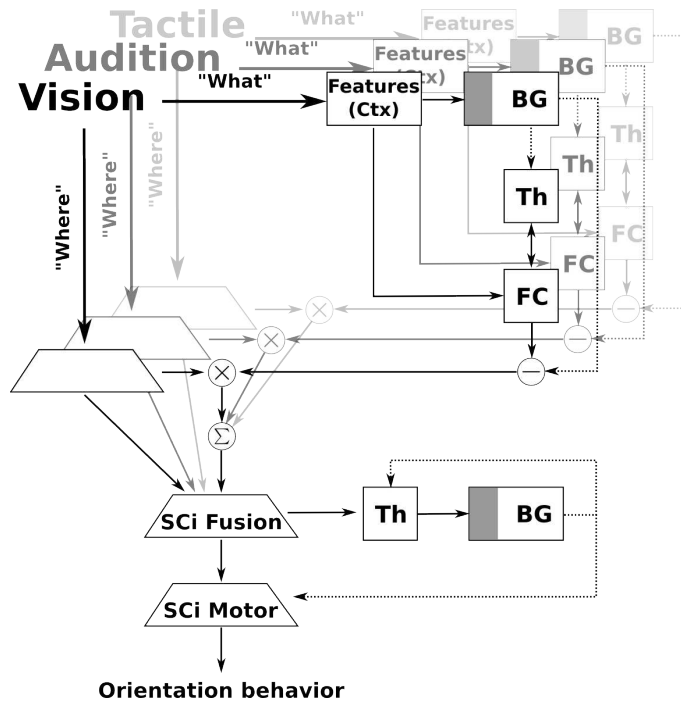


FIGURE 5.2 – Modèle d'intégration multi-sensorielle dans le SC avec sélection dans les boucles CBTC et STBS.

Aucun de ces modèles ne contient à la fois une intégration multi-sensorielle (reproduisant le MSE) et la sélection de cible par un modèle de BG avec apprentissage. Le modèle que nous avons développé se base sur le modèle de génération de saccades décrit en section 4.4.1. Il intègre donc des mécanismes de fonctionnement du SC basés sur un modèle neuromimétique récent [Tabareau et al., 2007] avec une modulation *top-down* corticale basée sur les *features*. De plus, contrairement aux travaux antérieurs qui viennent d'être cités, ce modèle intègre un modèle complet de BG [Girard et al., 2008] doté de mécanismes d'apprentissage par renforcement qui permettent de favoriser la sélection spatiale des cibles au niveau du SC ainsi que la sélection non-spatiale des *features* (*top-down*) modulant la saillance de ces cibles. Nous nous concentrons donc ici plutôt sur les données neuro-anatomiques après avoir décidé de ne pas explicitement implémenter la règle bayésienne.

5.4 Généralisation du modèle de génération de saccades

5.4.1 Modèle multi-sensoriel

Le colliculus supérieur – dont il vient d'être montré qu'il constitue une zone importante d'intégration multi-sensorielle – a été modélisé en section 4 pour le cas de la génération de saccades. Seules des informations visuelles entraient alors en jeu et ce modèle s'est avéré efficace.

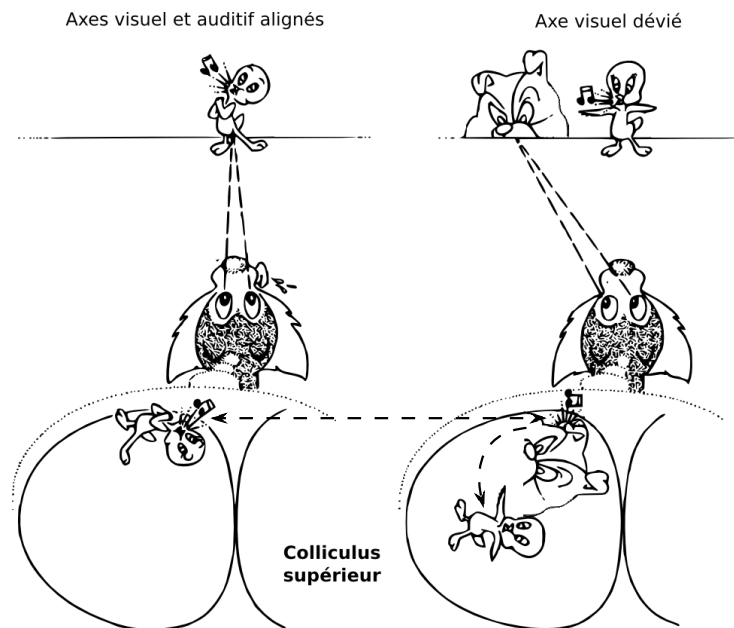


FIGURE 5.3 – Illustration du paradoxe que peut produire le désalignement des cartes du SC. Lorsque les axes visuel et auditif sont alignés (à gauche) l'image et le son de l'oiseau coïncident dans le SC. En revanche, si le regard est détourné (par exemple par la présence d'un chien, à gauche), l'image de l'oiseau se retrouve décalée sur la rétine et donc sa projection sur le SC l'est également. La tête et les oreilles n'ayant pas bougé, la projection du son de l'oiseau ne change pas et se retrouve associée à l'image du chien. Le chat pourrait donc ainsi penser que le chant de l'oiseau provient du chien. D'après [Stein and Meredith, 1993].

Il paraît donc maintenant possible de l'étendre aux autres modalités sensorielles décrites en sections 2 (tactile) et 3 (audition).

Alignement Comme nous l'avons vu, une des propriétés permettant l'intégration multi-sensorielle est l'alignement des cartes sensorielles. Au niveau du SC la représentation est rétino-centrée, il est donc nécessaire de maintenir les cartes auditive et tactile alignées avec la carte visuelle par un *feedback* de la position des yeux permettant un décalage des alignements du crano-centré vers le rétino-centré. Cette influence de la position des yeux permettant de conserver un alignement de la carte auditive, a été mesurée au niveau du colliculus supérieur [Jay and Sparks, 1984].

De plus, il existe des connexions entre des noyaux profonds du cervelet vers le SC propageant probablement le retour d'information de position des yeux [May et al., 1990], même si le rôle exact de cette connexion est toujours discuté. Nous faisons donc l'hypothèse qu'il existe bien un mécanisme de réaligement des cartes auditive et somatosensorielle en fonction de la position des yeux. Cet alignement est essentiel afin de conserver la bonne cohérence des représentations multi-sensorielles. Sans cet alignement, des paradoxes de dissociation sensorielle dus aux mouvements

des yeux par exemple, pourraient survenir (la figure 5.3 illustre ce paradoxe). Le réalignement des cartes lors des mouvements des organes sensoriels est une façon de remédier à ce problème. Cependant, ce réalignement n'est pas parfait et les mouvements des organes sont généralement de grande amplitude (et donc d'autant plus difficiles à compenser). Ainsi les champs récepteurs au niveau du SC sont également assez grands, ce qui permet, au détriment de la précision, de conserver une bonne coïncidence des stimuli. On remarquera par exemple que chez la chouette – animal dont les oreilles sont immobiles et qui est presque incapable de bouger les yeux – les cartes du SC restent très bien alignées et les champs récepteurs sont beaucoup plus restreints [Knudsen, 1982], assurant ainsi la précision nécessaire à son comportement de prédation. La chouette bouge donc ses yeux et ses oreilles ensemble en bougeant simplement la tête.

Dans le présent modèle, ce réalignement des cartes est effectué par un simple décalage de coordonnées lors de la projection sur la carte fusionnée.

Tout d'abord, une représentation spatiale des stimuli (carte *where*) est créée pour chaque modalité. Pour le sens tactile, une carte somatosensorielle des vibrisses est construite dans un repère cranio-centré qui sera réaligné à chaque mouvement des yeux. Nous ne représentons donc ici que les vibrisses en occupant une large zone du SC. En effet il semble que chez de nombreuses espèces (chat, rat, souris, iguane. . .) la face (et donc des vibrisses chez les animaux en possédant) est fortement sur-représentée [Stein and Meredith, 1993]. L'activité des vibrisses est représentée par des gaussiennes de large écart type (20°) localisées dans les demi-champs gauche et droit entre 20° et 40° horizontalement et entre -5° et -10° verticalement. Cette carte peut être vue comme le résultat de la projection « directe » du noyau trijumeau vers le SC. En effet des travaux récents [Cohen et al., 2008] ont montré que, par le biais de ce chemin neuronal, le SC était sensible aux stimulations des vibrisses et surtout aux stimuli de larges champs (*wide-field*) impliquant plusieurs vibrisses. Cette activité est également influencée par le cortex via une connexion du cortex à tonneaux vers le SC [Wise and Jones, 1977, Cohen et al., 2008].

Pour le sens auditif, une carte auditive est créée dans un repère également cranio-centré à partir de la combinaison des informations IID et ITD vue en section 3.3.2.1. On notera que, n'utilisant pas les techniques HRTF pour la localisation en élévation, cette carte ne présente qu'une seule dimension, l'azimut. Cependant, afin de permettre une projection homogène, cette information de localisation en une dimension est passée en deux dimensions simplement par une activité gaussienne avec un fort écart type en élévation (30°) permettant de couvrir toute la verticale. De plus la précision azimutale étant limitée (environ 10°), l'écart-type dans cette dimension est fixé à (15°). Cette carte auditive peut être vue comme le résultat de la projection du colliculus inférieur vers le SC [Zwiers et al., 2004].

Les cibles visuelles sont, elles, représentées plus précisément par des gaussiennes d'écart-types 5° horizontalement et verticalement. Tous les neurones des cartes mono-sensorielles sont des neurones de type IPDS [Girard et al., 2008] de mêmes paramètres.

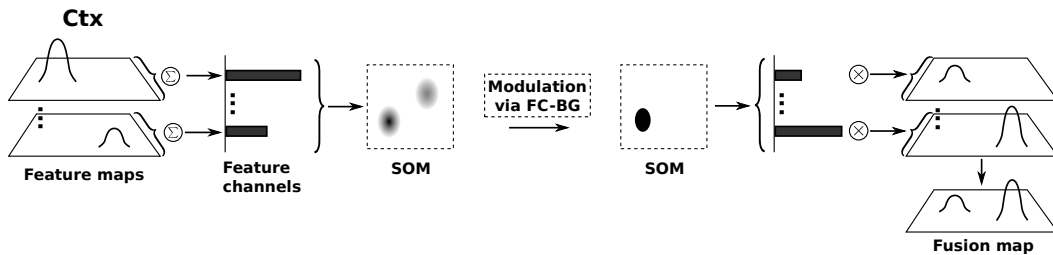


FIGURE 5.4 – Transformation « caractéristiques vers spatial » semblable à celui décrit en 4.12. En admettant que chaque canal de caractéristique module l’activité de toute une carte de caractéristique, chaque objet perçu est représenté par une activité gaussienne dont la position rétinotopique est préservée. L’amplitude d’activité représente l’amplitude de la caractéristique. La combinaison de ces caractéristiques est intégrée dans une carte auto-organisatrice (SOM).

Modulation *top-down* La prise en compte de la saillance des caractéristiques (*features*) pour chaque modalité passe par une modulation *top-down* des cartes unimodales. Pour chaque sens, les *features* sont représentées de manière non spatiale par des concaténations d’histogrammes – couleurs et orientations des bords pour la vision, intensité de l’IMP par canal pour le tactile et l’audition. Ici, on construit un histogramme par objet détecté (spatialement séparé). Une phase de pré-apprentissage *offline* (et non supervisé) par une carte auto-organisatrice (SOM) [Kohonen, 1982] permet d’apprendre à associer, à une combinaison de *features* particulière pour une modalité, l’activation d’un neurone. Ainsi après apprentissage, la perception d’un objet visuel rouge provoquera l’activation d’un neurone dans la SOM alors qu’un objet vert en activera un autre. Cette étape permet une discrimination et une sélection des différents stimuli à travers la boucle CBTC.

A la suite de la boucle CBTC, une SOM « sélectionnée » est obtenue et les canaux correspondants au neurone sélectionné sont modulés par l’activité après sélection (après interaction FC-BG).

Ceci revient simplement à généraliser le mécanisme de transformation « caractéristiques vers spatial » décrit en section 4.4.1 (cf. fig. 5.4) en ajoutant une étape avec cartes auto-organisatrices, ce qui permet d’utiliser, non plus seulement la couleur, mais n’importe quelle combinaison de *features* représentée par une SOM. La saillance finale d’un stimulus correspond donc à la somme (normalisée) des activités modulées de chacun de ses canaux. Par exemple, dans le cas simple d’objets visuels rouges et verts appris, les neurones de la SOM ne possèdent que deux dimensions correspondant au rouge et au vert. La présentation des deux objets, rouge et vert, provoquera l’activation de deux neurones différents de la SOM. Chacun de ces neurones ne possèdera alors qu’une seule de ces deux dimensions avec un poids non nul (le rouge pour l’un et le vert pour l’autre). La carte résultante (avec ces deux neurones activés) passera par une sélection à travers les BG. Si l’objet rouge est associé à une récompense, le neurone de la SOM représentant cet objet sera sélectionné aux dépens de l’autre. Le canal de la

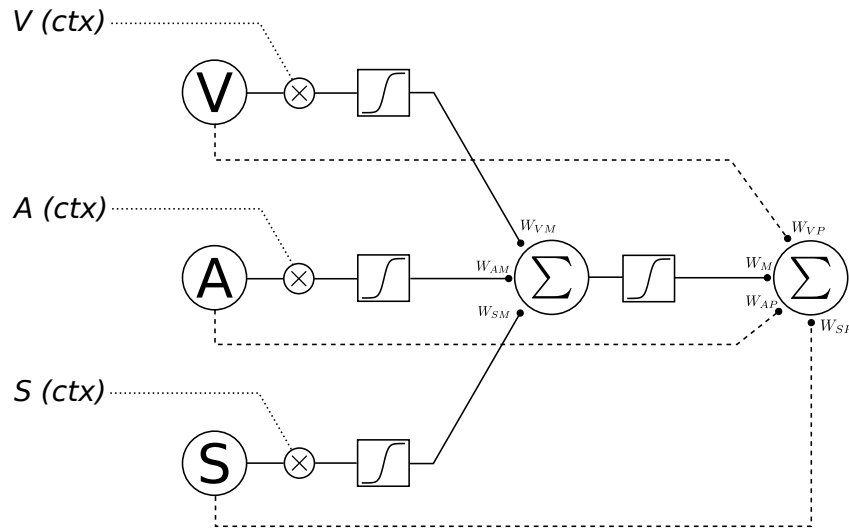


FIGURE 5.5 – Schéma représentant le mécanisme d'intégration multi-sensorielle dans le modèle. Les connexions primaires modulées par les entrées corticales X (ctx) (en pointillés), sont passées en entrée d'une fonction non-linéaire (sigmoïde), puis sommées et à nouveau passées à travers une sigmoïde. Le résultat de l'intégration est la somme de cette sortie non-linéaire et des entrées sous-corticales « directes » non modulées (en tirets). Les W_x représentent les poids de projection fixés dans le modèle.

couleur rouge (qui correspond à la dimension non nulle de ce neurone) sera alors modulé par la valeur du neurone après sélection. La saillance finale de l'objet rouge sera donc cette valeur, alors que la saillance de l'objet vert sera nulle (ou très faible).

Nous avons choisi de modéliser l'influence corticale par des entrées modulatrices. Cette solution nous apparaît comme la plus parcimonieuse. Des entrées modulatrices ont également été utilisées dans des modèles précédents [Patton and Anastasio, 2003, Anastasio and Patton, 2003], alors que certains auteurs ont explicitement évité ce choix en utilisant plutôt des compétitions via des inter-neurones inhibiteurs [Magosso et al., 2008, Ursino et al., 2009, Cuppini et al., 2010]. Une des explications physiologiques possibles de cette modulation corticale pourrait faire appel aux récepteurs NMDA connus pour jouer un rôle important dans l'intégration multi-sensorielle dans le SC [Binns and Salt, 1996]. Une autre explication pourrait impliquer les récepteurs métabotropiques du glutamate [Anwyl, 1999].

Intégration au niveau du neurone Une fois obtenues les cartes mono-sensorielles modulées par une influence *top-down*, l'intégration multi-sensorielle à proprement parler se fait au niveau du neurone dans le SC de la carte SCi Fusion (cf. fig. 5.5). Cette intégration est ici effectuée par la simple somme pondérée de l'activité des neurones des cartes mono-sensorielles (non-linéaires après sigmoïde), à l'entrée d'un neurone de fonction de transfert également non linéaire.

On peut noter qu'il existe tout de même des connexions sous-corticales « directes » provenant des entrées mono-sensorielles (en tirets sur le figures 5.5). Ces connexions ne sont pas modulées par le cortex et permettent au système de produire un comportement en l'absence de cortex, mais pas de comportement d'intégration. Des poids (W_{xP} et W_M) sur la couche finale permettent d'ajuster l'influence relative de l'intégration dépendante du cortex et des connexions directes.

La fonction sigmoïde $\varphi(u(t))$ utilisée est donnée par :

$$\varphi(u(t)) = \frac{1}{1 + e^{(s-u(t)) \times p}} \quad (5.2)$$

avec s le point central et p la valeur de la pente en ce point.

L'activité en entrée de chaque neurone de la carte fusionnée est donc donnée par :

$$u_f(t) = W_M \times \varphi\left(\sum W_{iM} \times \varphi(u_i(t) \times M_{ctx}^i(t))\right) + \sum W_{iP} \times u_i(t) \quad (5.3)$$

avec $u_i(t)$ et $M_{ctx}^i(t)$ respectivement l'activité et la modulation corticale de la $i^{\text{ème}}$ modalité sensorielle.

L'utilisation d'une fonction de transfert non linéaire de type sigmoïde s'est déjà avérée efficace pour simuler le phénomène de MSE [Patton and Anastasio, 2003, Ursino et al., 2009, Cuppini et al., 2010] et ne fait appel qu'aux propriétés non-linéaires classiquement observées des neurones.

5.4.2 Orientation

Dans le chapitre 4 nous avons utilisé un modèle de SC afin de générer des saccades oculaires. Ces saccades sont généralement étudiées dans le cas d'animaux dont la tête est fixée. Or il apparaît, dans les cas plus « naturels » où l'animal est libre de ses mouvements, que les stimulations du SC ne génèrent pas seulement des saccades, mais également des mouvements de la tête et du corps [Schiller, 1972, Dean et al., 1986, Guillaume and Pélisson, 2001, Pélisson et al., 2001], du bras (pour attraper un objet) [Lünenburger et al., 2001, Stuphorn et al., 2000, Crawford et al., 2004], de locomotion [Cooper et al., 1998, Felsen and Mainen, 2008] et de l'attention en général [Kustov and Robinson, 1996, Krauzlis, 2007].

Par exemple, une expérience récente [Felsen and Mainen, 2008] montre que l'activité du SC est reliée au comportement d'orientation de la locomotion d'un rat guidé par une odeur dans un labyrinthe.

Il semble donc possible de généraliser le modèle de SC à la génération d'un comportement plus général d'orientation, pouvant se représenter comme un vecteur dans un espace tridimensionnel rétinocentré. Ce vecteur d'orientation peut alors « entraîner » toute une cascade de mouvements (yeux, tête, corps...). Nous nous contentons ici d'utiliser l'angle des yeux et une vitesse fixe (nulle si aucune cible

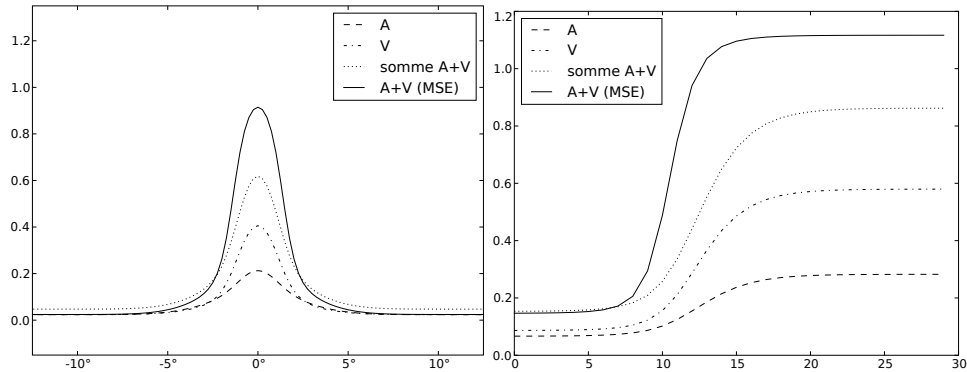


FIGURE 5.6 – Comportement de l’intégration multimodale en réponse à des stimuli visuel et auditif. A gauche, réponse à des stimuli gaussiens en fonction de la position. L’intégration est bien sur-additive. A droite réponse en fonction de l’intensité des stimuli. Les paramètres du modèle ont été fixés de façon à ce qu’un stimulus visuel soit plus important qu’un stimulus auditif. L’intégration entraîne une plus grande dynamique que les stimuli mono-sensoriels seuls. En pointillés les courbes prédisant la réponse dans le cas d’une simple somme.

n’est présente) comme composantes de ce vecteur¹.

Dans le modèle décrit ici, le vecteur 3D obtenu sert à générer des mouvements d’orientation selon un fonctionnement hiérarchique simplifié partant des yeux, puis de la tête suivant les mouvements des yeux (après un filtre passe bas), puis enfin du corps tout entier suivant la tête. Le mouvement du corps par rapport à la tête est ici calculé par une simple cinématique inverse. Au final le comportement obtenu est du type *goal directed locomotion* [Grillner et al., 2008], ce qui pourrait se rapprocher du domaine robotique de la *commande référencée capteur* [Chaumette, 1990, Samson et al., 1991].

5.5 Expériences

5.5.1 Amélioration multi-sensorielle

Comme nous l’avons vu précédemment, une des propriétés essentielles des neurones multi-sensoriels du SC est de provoquer une amélioration multi-sensorielle (MSE), c’est-à-dire que l’intégration des stimuli mono-sensoriels est plus forte que la simple somme de ces stimuli. En d’autres termes la fonction de transfert de ces neurones est non-linéaire. Cette MSE est définie comme suit [Stein and Meredith, 1993] :

$$MSE(\%) = \left(\frac{CM - SM_{max}}{SM_{max}} \right) \times 100$$

1. Notons qu’il serait également possible d’utiliser l’information de disparité binoculaire comme composante de ce vecteur. La disparité permettant d’estimer la distance de la cible par rapport aux yeux, il suffirait alors de se servir de cette distance pour une commande en position.

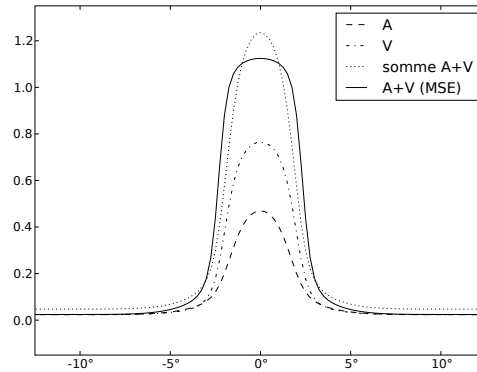


FIGURE 5.7 – Idem qu'en Figure 5.6 mais cette fois avec des stimuli d'intensité plus grande. Ici l'intégration est sous-additive.

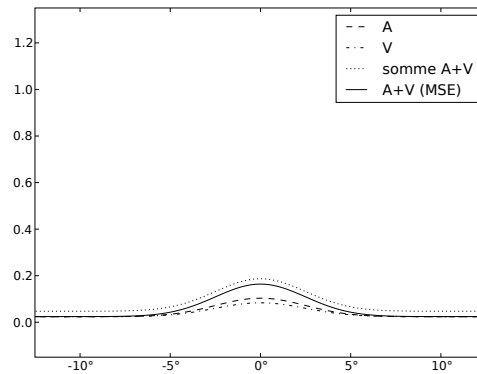


FIGURE 5.8 – Idem que Figure 5.6 mais avec la modulation corticale désactivée. Une activité mono-sensorielle faible est toujours présente ainsi qu'une activité multi-sensorielle faible additive.

avec CM la réponse multi-sensorielle et SM_{max} la réponse de la modalité seule la plus forte.

On peut voir sur la figure 5.6 (gauche) un exemple d'intégration obtenu avec le modèle en réponse à des stimuli auditifs et visuels, avec une MSE sur-additive de 120 %. Cette MSE est d'autant plus grande que les stimuli sont faibles. La Figure 5.7 montre une intégration avec des stimuli plus forts qui produit une MSE sous-additive de 46 %. Le principe d'efficacité inverse est donc bien reproduit. Ce phénomène d'amplification des faibles stimuli permet, notamment, de déclencher un comportement d'orientation en direction d'un stimulus qui aurait été trop faible seul, ou bien de biaiser le choix d'un stimulus lorsque plusieurs sources de même saillance sont présentes.

Les stimuli intégrés ont également une plus grande dynamique que les stimuli seuls (cf. fig. 5.6, droite). Dans notre modèle ceci est dû à la réponse également non-linéaire des modalités modulées dont les paramètres sont, ici, réglés de façon à produire un sens visuel plus important que le sens auditif.

Il résulte de l'organisation même de ce modèle que, si l'on désactive l'influence *top-down* du cortex (les modulations,) les cartes mono-sensorielles fonctionnent toujours avec une activité faible de base (paramétrable, mais indépendante de la pertinence du stimulus) mais, leurs projections vers la carte multi-sensorielle n'étant plus modulées, le phénomène d'intégration n'apparaît plus. En revanche, il reste bien une activité multi-sensorielle additive faible, cette activité résiduelle n'étant due qu'aux projections sous-corticales des cartes mono-sensorielles (cf. fig. 5.8). Ce comportement correspond qualitativement aux données physiologiques mesurées montrant que le cortex dirige les réponses d'intégration multi-sensorielles mais pas les réponses mono-sensorielles [Alvarado et al., 2007]. Dans notre modèle la désactivation des zones du cortex impliquées empêche le comportement de MSE tout en laissant quand même une activité multi-sensorielle résiduelle, avec une réduction de l'amplitude des réponses mono-sensorielles.

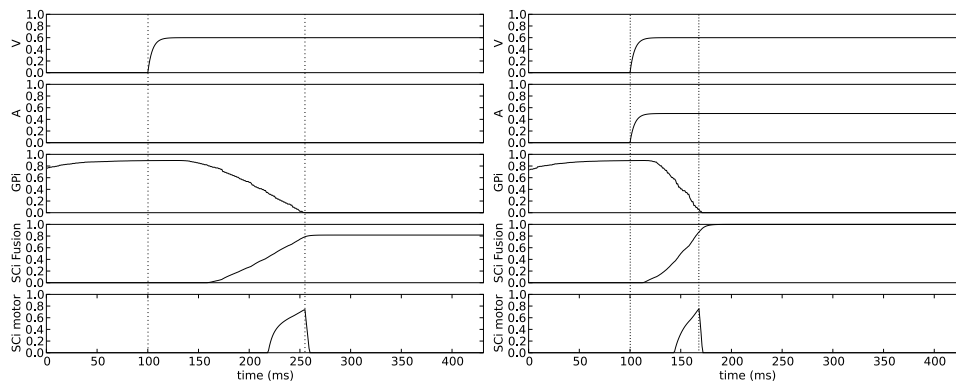


FIGURE 5.9 – Activité des neurones du modèle sur les couches visuelle (V), auditive (A), en sortie des BG (GPi), en couche fusionnée (SCi fusion) et en couche motrice (SCi motor), pour une stimulation visuelle simple (gauche) et pour une stimulation visuelle et auditive (droite). Les stimuli apparaissent à 100 ms, le temps de réaction (avant déclenchement d'une saccade) est de 154 ms pour le stimulus visuel seul et de 67 ms pour le stimulus visuel et auditif.

Un autre phénomène lié à l'amélioration multi-sensorielle concerne le temps de réaction. En effet, il apparaît comportementalement que le temps de réaction avant déclenchement d'une saccade se trouve diminué en présence de stimuli multi-sensoriels concordants par rapport à des stimulations mono-sensorielles [Hershenson, 1962, Andreassi and Greco, 1975, Hughes et al., 1994, Forster et al., 2002]. Notamment, les saccades oculaires sont initiées plus rapidement [Hughes et al., 1994, Frens et al., 1995, Colonius and Diederich, 2003, Amlôt et al., 2003, Diederich et al., 2003]. Le présent modèle de SC permet d'expliquer ce phénomène. En effet, comme décrit en section 4, dans le modèle de SC les neurones LLB reçoivent l'activité globale de la carte fusionnée et, lorsque ceux-ci passent un certain seuil d'activité, ils désactivent l'inhibition de la carte motrice par l'intermédiaire des OPN. Or, grâce à l'intégration et au phénomène de MSE, les stimuli multi-sensoriels sont bien plus intenses que les

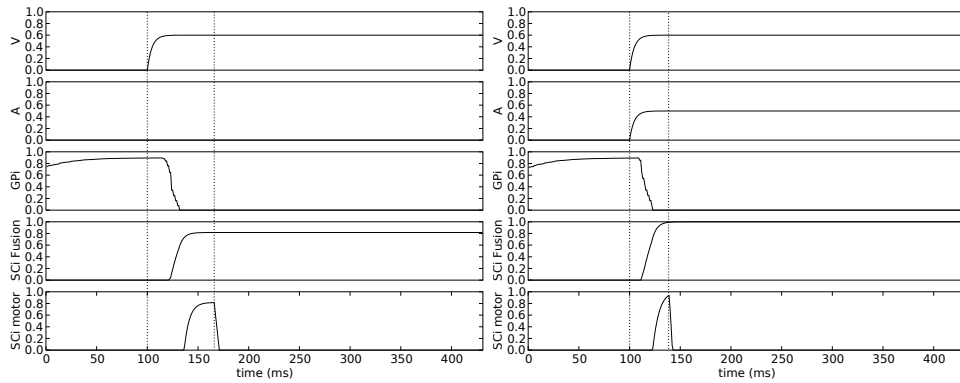


FIGURE 5.10 – Idem que figure 5.9 mais avec apprentissage préalable des BG. Le temps de réaction est bien plus court et on constate tout de même une diminution dans le cas d’un stimulus visuel et auditif. Les temps de réaction sont ici de 66 ms pour une cible visuelle seule et de 39 ms pour une cible visuelle et auditive.

stimuli mono-sensoriels, ce qui provoque une montée d’activité des LLB plus rapide et donc une atteinte du seuil, elle aussi, plus rapide, déclenchant une réaction dans la carte motrice.

De plus, par l’interaction avec les BG, la couche fusionnée se trouve en compétition avec l’inhibition des BG. Un stimulus plus fort entraîne une déshinhibition plus rapide des BG et donc une réaction plus rapide de la couche motrice. Ici les BG « ralentissent » en fait le processus. Le résultat comportemental est donc une saccade déclenchée avec un temps de latence plus court lors d’un stimulus visuel et auditif que lors d’un stimulus visuel seul (cf. Fig 5.9). On constate qu’après apprentissage (spatial) des cibles, les BG se désinhibent beaucoup plus rapidement, laissant ainsi l’activité au niveau de la carte fusionnée monter quasiment sans compétition et provoquant ainsi un temps de réaction plus faible (cf. fig. 5.10).

Ce comportement pourrait se rapprocher de celui des *saccades expresses* [Fischer and Breitmeyer, 1987], qui sont des saccades se déclenchant particulièrement rapidement (~ 100 ms chez l’homme contre ~ 200 ms normalement). Ce type de saccade semble se déclencher dans certains cas particuliers. La disparition de l’indice de fixation avant l’apparition de la cible favorise le déclenchement de saccades expresses (avec un effet maximum pour un délai de 200 ms entre les deux). L’apprentissage de la cible ou l’apparition d’une cible multimodale favorisent également ce phénomène (pour une revue voir par exemple [Boch and Fischer, 1986]). Plusieurs théories cherchant à expliquer ce phénomène existent, qui peuvent être classées en deux catégories :

la *compétition parallèle (race)* où deux processus effectués en parallèle sont en compétition (par exemple la vision et l’audition), le premier ayant terminé déclenchant un comportement (ici une saccade). Ce type de système est associé à un gain résultant de la co-activation des deux processus parallèles.

L’*organisation en série* dans laquelle les processus s’effectuent en série et les

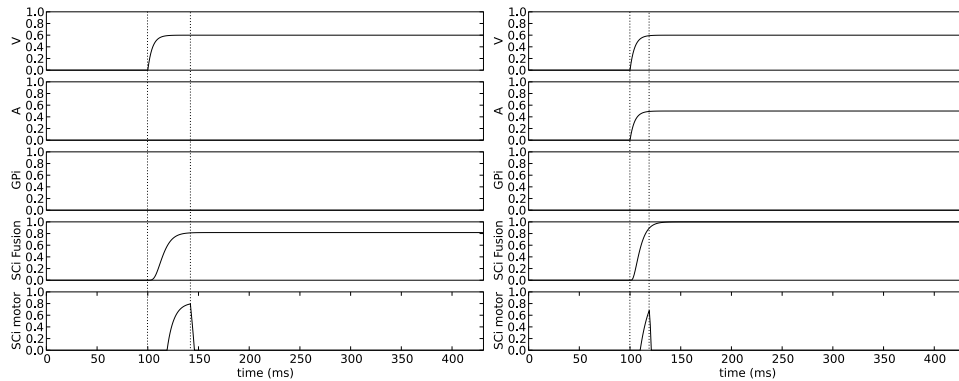


FIGURE 5.11 – Idem que figure 5.9 mais sans inhibition des BG. Le temps de réaction est bien plus court et on constate tout de même une diminution dans le cas d’un stimulus visuel et auditif. Les temps de réactions sont ici de 41 ms pour une cible visuelle seule et de 18 ms pour une cible visuelle et auditive.

temps de traitement s’additionnent [Nozawa et al., 1994].

Il semble en fait qu’une combinaison de ces deux mécanismes soit la plus probable [Nozawa et al., 1994]. Les informations des différentes modalités sont acheminées en parallèle et leur intégration est agencée en série avec le processus responsable des saccades expresses. Notre modèle respecte cette dernière observation, les informations sensorielles étant évidemment traitées en parallèle et l’intégration s’effectuant en série avec l’inhibition des BG et la génération de commande motrice.

Une forte réduction de la latence est également observable dans le cas où les BG sont désactivés (la connexion SNr vers SC) mais avec des temps réactions plus court encore grâce à l’absence totale de compétition avec l’inhibition des BG (cf. Fig 5.11). Cette désactivation de l’inhibition des BG provoque un comportement de type hyperkinétique (générant de rapides mouvements « incontrôlés » vers tous les objets perçus). De même en désactivant la connexion SC-Th-Striatum on observe le comportement inverse : les BG ne recevant plus les entrées du SC, ce dernier reçoit une constante inhibition provoquant une hypokinésie (aucun mouvement dans notre cas avec un fort poids de projection SNr vers SC).

Tout comme nous avons défini précédemment la notion de MSE, nous pouvons définir la MRE (*Multi-sensory Response Enhancement*) [Colonius and Diederich, 2003] :

$$MRE(\%) = \left(\frac{RT_{unimodal} - RT_{multimodal}}{RT_{unimodal}} \right) \times 100$$

avec $RT_{unimodal}$ et $RT_{multimodal}$ représentant respectivement les temps de réaction pour un stimulus uni-modal et multi-modal. On obtient donc des MRE similaires de 56 % avec et sans BG et de 41 % avec apprentissage. On notera tout de même que les paramètres du modèle n’ont pas ici été ajustés dans le but de correspondre aux temps de réactions mesurés chez l’humain (qui sont de l’ordre de 200 ms [Wurtz and Goldberg, 1989]) et que les temps de réactions du modèle (entre 50 et

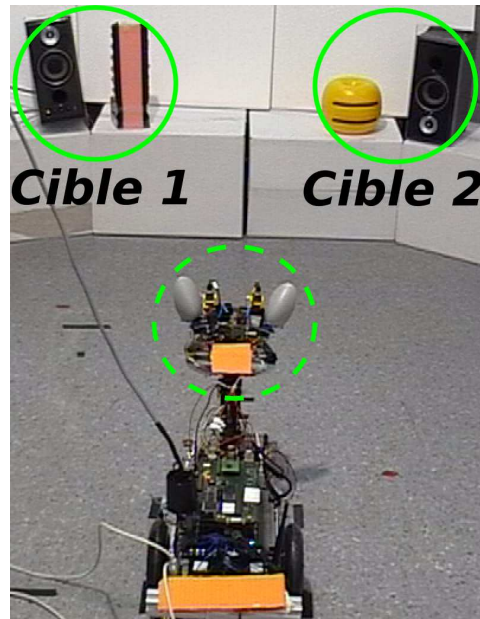


FIGURE 5.12 – Protocole expérimental pour les tâches de détection et d'orientation.

150 ms environ) sont plutôt qualitatifs. De même les MRE observés chez l'humain sont de l'ordre de 10 % [Colonius and Diederich, 2003], donc plus faibles que ceux produits par le modèle.

5.5.2 Comportement

Nous nous intéressons ici à l'impact comportemental de l'intégration multi-sensorielle au niveau du SC. Comme nous l'avons vu, cette intégration provoque une amplification de l'activité neuronale en réponse aux stimuli. Nous avons montré que cette amplification provoquait une diminution du temps de réaction au niveau neuronal (et donc dans les comportements déclenchés). Cependant, on sait que l'intégration joue également un rôle important dans la capacité de détection des stimuli et donc dans l'orientation vers ceux-ci [Stein et al., 1988, Stein et al., 1989], ce que nous nous proposons de tester.

5.5.2.1 Détection

Sans apprentissage Nous testons tout d'abord les capacités de détection de cibles indépendantes de la tâche (sans récompenses). Ici deux cibles visuelles de saillances similaires sont présentées à gauche (cible 1) et à droite (cible 2) et peuvent être associées à des stimuli auditifs différents (cf. fig. 5.12). On considère qu'une cible est détectée lorsqu'une saccade est déclenchée dans sa direction. Les cibles visuelles et auditives sont *supra-threshold*, c'est-à-dire qu'elles sont d'intensité suffisante pour provoquer individuellement une saccade.

Nous pouvons tout d'abord noter que, lors de la présentation des cibles visuelles

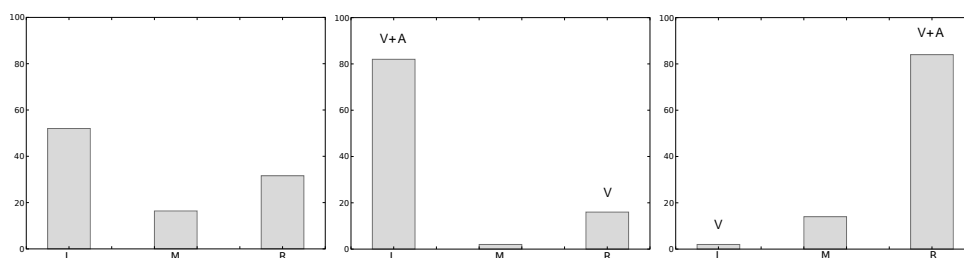


FIGURE 5.13 – Performances de déclenchement de saccade. Vers des stimuli visuels seuls (gauche). Vers des stimuli visuels et auditifs (milieu et droite). L : saccade vers la cible gauche, M : saccade moyenne ou absence de saccade, R : saccade vers la droite. Les stimuli sont d'intensité suffisante pour individuellement provoquer une saccade (*supra-threshold*).

seules, le comportement résultant est une hésitation entre ces cibles gauche et droite avec un relativement faible taux de saccades moyennes (fig. 5.13, gauche). On notera que le léger biais en faveur de la cible gauche est dû à sa saillance très légèrement supérieure.

Si l'on ajoute maintenant aux cibles visuelles des stimuli auditifs spatialement concordants, la détection se voit largement biaisée en direction de la cible combinant vision et audition (fig. 5.13, milieu et droite). L'amélioration multi-sensorielle a donc ici pour conséquence comportementale d'augmenter la probabilité de détection d'une cible, ce qui correspond bien au comportement enregistré chez l'animal [Stein et al., 1988, Stein et al., 1989].

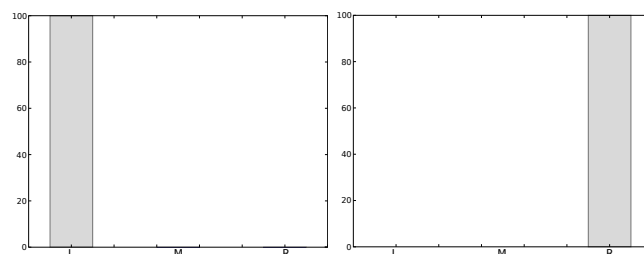


FIGURE 5.14 – Performances de déclenchement de saccade vers des stimuli visuels et auditifs (à gauche pour une cible auditive à gauche, à droite pour une cible auditive à droite). Les stimuli sont d'intensité ne permettant pas individuellement de provoquer une saccade (*sub-threshold*).

De plus, lorsque les stimuli présentés sont *sub-threshold*, c'est-à-dire d'intensité trop faible pour déclencher individuellement une saccade, on constate une amélioration considérable de la détection. En fait, ici 100 % des cibles combinant vision et audition provoquent une saccade dans leur direction (alors que vision ou audition seules ne sont jamais détectées). Cette expérience montre bien l'avantage comportemental de l'intégration multi-sensorielle et en particulier celui de son efficacité inverse : là où des stimuli mono-sensoriels sont trop faibles pour pouvoir être détec-

tés, les stimuli multi-sensoriels le sont de manière très fiable.

La différence de performance entre la détection dans le cas de stimuli *supra-threshold* et *sub-threshold* reflète bien comportementalement le phénomène d'efficacité inverse. En effet, ici l'amélioration comportementale de détection de cibles est d'autant plus grande que l'intensité des cibles mono-sensorielles est faible.

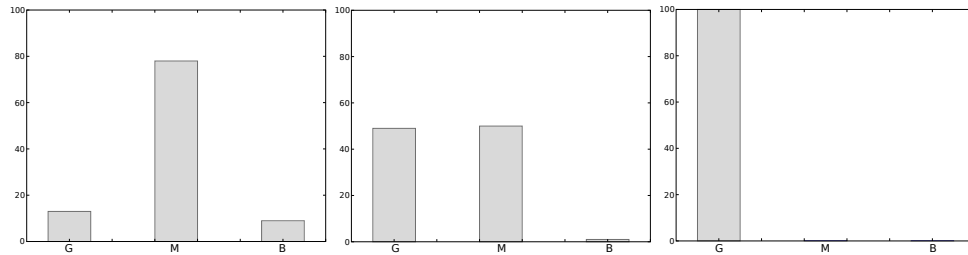


FIGURE 5.15 – Performances de déclenchement de saccade vers des stimuli visuels et auditifs, avant apprentissage (gauche), et après apprentissage (au milieu et à droite). Au milieu, les stimuli visuels et auditifs appris sont séparés, à droite, ils sont concordants. G : saccade vers la cible visuelle apprise ; M : saccade moyenne ou absence de saccade ; B : saccade vers la mauvaise cible visuelle. Les stimuli sont d'intensité suffisante pour individuellement provoquer une saccade (*supra-threshold*).

Apprentissage Au delà de la simple détection de cibles, notre modèle permet également de favoriser les cibles susceptibles de rapporter une récompense (cf. section 4).

Ici nous nous limitons à un apprentissage non spatial des caractéristiques des cibles, c'est-à-dire au niveau des différentes boucles CBTC.

Le protocole est le même que précédemment, à la différence que le système aura précédemment appris à préférer une cible visuelle par rapport à l'autre, ainsi qu'un son par rapport à l'autre. Les deux cibles visuelles et auditives sont présentées simultanément.

La figure 5.15 montre les performances obtenues. On constate que, avant apprentissage, la présentation des deux cibles visuelles et auditives en même temps provoque une hésitation avec majoritairement une saccade moyenne ou aucune saccade (cf. fig. 5.15, gauche). Après apprentissage, si l'on combine la cible visuelle apprise avec le mauvais son, le comportement résultant est, soit une saccade vers la bonne cible visuelle, soit une saccade moyenne ou pas de saccade, avec un très faible taux de saccade vers la combinaison mauvaise cible visuelle + bonne cible auditive (cf. fig. 5.15, milieu).

Enfin, lorsque la bonne cible visuelle est combinée avec la bonne cible auditive, le choix est ici sans erreur et se traduit par une saccade vers la bonne combinaison (cf. fig. 5.15, gauche). Le modèle possède donc la capacité de reproduire les comportements d'amélioration multi-sensorielle avec la possibilité de moduler ces comportements selon la pertinence (d'un point de vue de la récompense). On note

que, dans ce dernier cas, malgré la présence de cibles visuelles et auditives combinées à droite et à gauche, seules les cibles associées à une récompense provoquent une réaction. Il y a donc bien amélioration multi-sensorielle pour les cibles apprises, mais également dépression multi-sensorielle pour les cibles non apprises.

5.5.2.2 Orientation

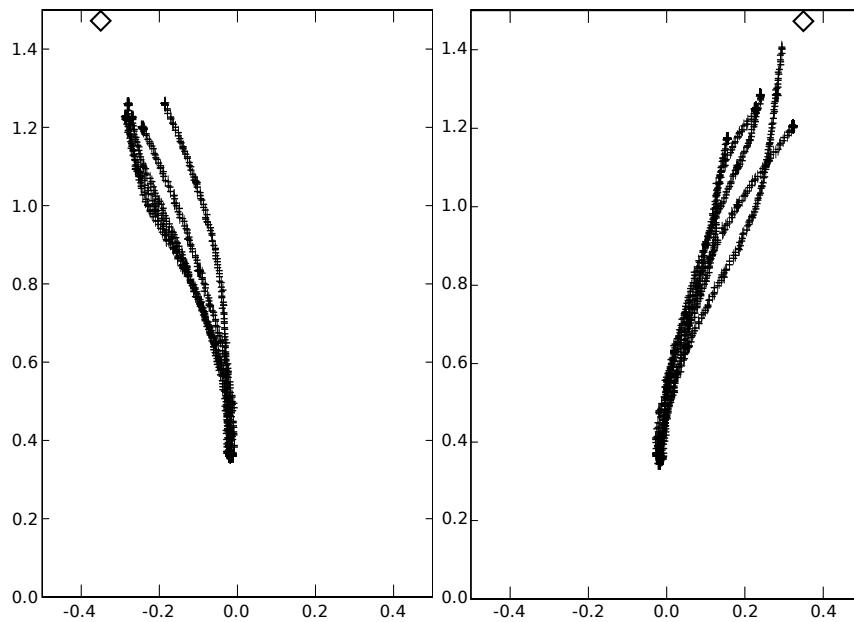


FIGURE 5.16 – Trajectoires d’orientations obtenues pour des cibles visuelles et auditives apprises. Les « bonnes » cibles visuelles et auditives sont placées en concordance. Les trajectoires ainsi enregistrées sont celles de l’axe du cou. Le losange indique la position du but.

Chez l’animal, comme pour un robot mobile, la capacité de détection est nécessaire mais pas suffisante. En effet, afin de poursuivre une proie par exemple, cette détection doit être stable dans le temps et doit pouvoir générer un comportement d’orientation plus général.

La figure 5.16 montre des exemples de trajectoires obtenues dans le cas de cibles visuelles et auditives apprises avec le même protocole que décrit en figure 5.12. Les cibles visuelles et auditives récompensées sont placées en correspondance. On constate que le robot se dirige toujours vers les cibles récompensées quelles que soient leurs positions. Le système permet donc de détecter et de se diriger vers des indices intéressants.

5.5.2.3 Expérience trimodale

Afin de tester les capacités comportementales du système dans le cas trimodal, nous avons conduit une expérience de détection avec une combinaison de stimuli

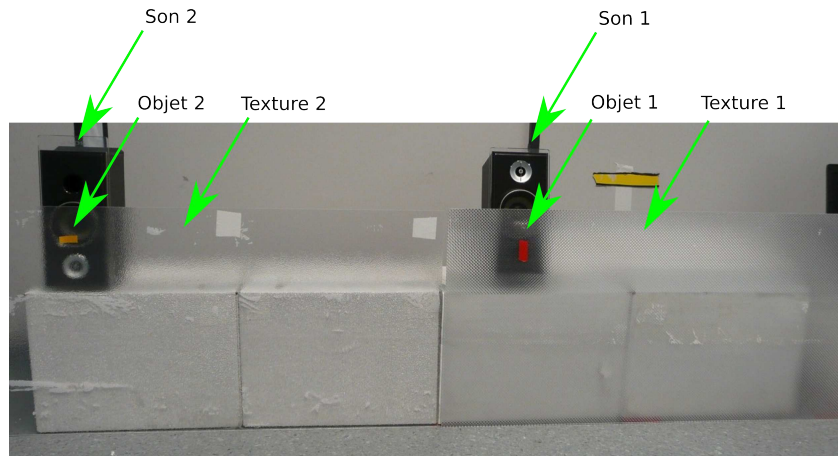


FIGURE 5.17 – Protocole expérimental pour l'expérience combinant les trois modalités sensorielles. Les stimuli récompensés sont l'objet 1 le son 1 et la texture 1.

visuels, auditifs et tactiles (cf. fig. 5.17). De la même manière que précédemment, les différents stimuli sont préalablement appris indépendamment. Notons qu'ici les contraintes imposées par le système vibrissal pour la reconnaissance de textures nous obligent à faire rouler le robot à vitesse constante le long d'un jeu de textures (textures A et D de la section 2.4.2). Ainsi la tête du robot est tournée de 60° vers la droite afin que les vibrisses frottent correctement contre les textures et que les indices visuels (rubans adhésifs rouges et jaunes placés verticalement et horizontalement) soient vus. L'intensité des stimuli est fixée à un niveau *sub-threshold* afin que seule la combinaison des trois soit détectée. Enfin, si la bonne combinaison de stimuli est détectée, une saccade est déclenchée et le robot s'arrête de rouler, sinon il continue d'avancer.

T1	A1	A2	T2	A1	A2
V1	10	0	V1	1	0
V2	0	0	V2	0	0

TABLE 5.1 – Résultats obtenus pour les différentes combinaisons possibles de stimuli sur 10 expériences à chaque fois.

On constate ici, comme précédemment, que l'amélioration multi-sensorielle combinée à l'apprentissage non spatial entraîne des performances excellentes (cf. tableau 5.1). De plus, ici les stimuli sont *sub-threshold*, ajoutant ainsi une efficacité inverse permettant à chaque stimulus mono-sensoriel d'être d'intensité très faible.

Cette expérience montre que le système est capable d'intégrer les modalités visuelle, auditive et tactile de manière comportementalement efficace et adaptée à la recherche d'une récompense.

5.6 Discussion

Nous avons décrit ici un modèle de colliculus supérieur en interaction avec un modèle de ganglions de la base permettant l'intégration multi-sensorielle. Ce modèle prend en entrée des connexions sous-corticales « directes » modulées par des entrées corticales « indirectes ». Nous discutons ici des réponses qu'apporte notre modèle aux problèmes de base de l'intégration multi-sensorielle vus en introduction.

Neuro-anatomie Contrairement à certains précédents travaux [Anastasio et al., 2000, Patton and Anastasio, 2003], le modèle décrit ici possède des entrées sous-corticales fournissant l'information de localisation des stimuli (*where*) uniquement. Les activités produites au niveau des cartes mono-sensorielles (ainsi qu'au niveau multi-sensoriel en partie) ne dépendent donc pas du cortex. En ce sens, ce modèle propose un mécanisme biologiquement plausible d'un point de vue évolutif, le colliculus supérieur étant une des plus anciennes structures du cerveau, apparue avant le cortex. L'influence corticale est « ajoutée » par dessus ces connexions sous-corticales et permet donc une modulation de celles-ci. Les connexions sous-corticales non modulées permettant de maintenir une activité mono- ainsi que multi-sensorielle faible (sans intégration) apparaîtraient ainsi comme des sortes de vestiges. Ces activités non modulées ont été simplement modélisées ici par des gaussiennes d'amplitudes fixes paramétrables.

Le micro-circuit proposé ici pour la convergence des informations multi-sensorielles (fig. 5.5) est délibérément simpliste, c'est-à-dire qu'il ne comporte pas de mécanisme de compétition à travers des inter-neurones inhibiteurs, ni d'interaction entre les cartes mono-sensorielles. Cette simplicité est inspirée du modèle de Patton et Anastasio (2003) montrant qu'il est possible de reproduire les phénomènes de MSE avec un simple perceptron grâce à une fonction de transfert non-linéaire. De plus, Anastasio et Patton ont montré qu'en utilisant une telle structure il est possible de reproduire une intégration statistiquement optimale (au sens bayésien), propriété que nous n'avons pas explorée.

Inférence statistique Comme évoqué en section 5.3, l'approche bayésienne pose le problème de comprendre de quelle manière les distributions des probabilités de présence des objets pourraient être encodées sous forme neuronale. En effet, malgré les fortes présomptions qu'indiquent les données comportementales, il apparaît qu'aucune donnée neuro-physiologique ne renseigne sur ce possible encodage.

Il existe quelques travaux tentant de répondre à cette question (cf. section 5.3). Nous avons cependant décidé de ne pas nous engager dans cette approche bayésienne, notamment parce qu'une structure de type perceptron similaire à la nôtre a déjà permis de modéliser une intégration optimale au sens de l'inférence statistique [Anastasio and Patton, 2003]. Il serait donc intéressant, dans le cadre d'un prolongement de cette thèse, d'explorer dans quelle mesure le modèle présenté ici permet de s'approcher des comportements optimaux. Si tel s'avérait être le cas, cela constituerait une validation supplémentaire de notre modèle. Ce serait également le

premier exemple d'un modèle neuro-mimétique d'intégration optimale fonctionnant sur un robot.

Il est cependant possible d'envisager les comportements optimaux observés chez l'humain selon un angle différent. Notre modèle – de par ses boucles à travers les BG comprenant un apprentissage par renforcement – permet plutôt de provoquer un comportement d'orientation maximisant la récompense. Les neurones multi-sensoriels de notre modèle de SC tendent donc, non pas à représenter la probabilité *a posteriori* de présence d'une cible, mais à maximiser la probabilité d'une récompense. De ce point de vue, ces neurones multi-sensoriels représentent donc le résultat d'une prise de décision effectuée par les BG.

Or, il est peut être possible de considérer ce problème d'intégration optimale dans le cadre de la prise de décision bayésienne. De ce point de vue plusieurs mécanismes peuvent entrer en jeu.

Par exemple, il a été récemment suggéré que les BG seraient capables d'implémenter une prise de décision optimale au sens bayésien (voir [Bogacz and Gurney, 2007] où un modèle est également proposé). Dans ce cas les décisions prises par les BG pourraient tendre à l'optimalité et ainsi peut être expliquer les comportements qui nous intéressent.

Une autre possibilité, proche de la précédente, concerne le domaine de l'apprentissage par renforcement. Celui-ci, en tant que processus de décision markovien peut également être interprété dans le cadre bayésien (voir par exemple [Ghavamzadeh and Engel, 2007] pour un algorithme « Acteur-Critique » bayésien). Donc de la même manière, les BG de par leur apprentissage pourraient encore une fois expliquer des décisions optimales.

Notre modèle nous conduit donc à suggérer que les phénomènes comportementaux optimaux observés sont, en fait, le résultat d'une prise de décision optimale des BG plutôt qu'une intégration optimale au niveau du SC. Cette interprétation ne nie pas les phénomènes de MSE mesurés dans le SC, phénomènes qui permettent une amélioration importante des capacités de détection des cibles et sont donc indispensables à la prise de décision. Cependant, sur ce point, notre modèle prédit qu'une cible – même multimodale – peut se voir très faiblement représentée dans le SC (par le biais de l'inhibition des BG) si cette cible n'est pas associée à une récompense. Cette prédiction va à l'encontre de l'interprétation basique d'une intégration optimale qui ne se soucie pas de l'intérêt comportemental des cibles. De futures investigations sont toutefois nécessaires afin de valider ou non cette hypothèse.

Mise en correspondance La « mise en correspondance » – nécessaire afin de regrouper ensemble des informations de modalités différentes mais provenant d'un même objet – est ici résolue grâce à l'alignement spatial des cartes sensorielles. Afin de mettre en correspondance les informations auditives 1D avec les autres modalités 2D, nous avons décidé « d'étirer » ces informations en leur conférant une activité gaussienne de large écart type en élévation. Cette solution s'est avérée efficace pour la localisation de cibles visuelles et auditives horizontalement séparées. Dans le cas

de cibles disposées sur le même axe vertical, l'ambiguïté de la localisation sonore aurait évidemment posé problème et on aurait pu générer des illusions de type ventriloquisme.

L'utilisation d'un référentiel commun à tous les sens (rétino-centré) permet donc la mise en correspondance des stimuli provenant des mêmes sources : c'est l'information de localisation des cibles. Toutefois, chez l'animal comme dans le modèle présenté, cette mise en correspondance n'est pas parfaite et varie en fonction de l'amplitude des mouvements et de la précision des modalités. Ce problème de réalignement est connu sous le terme de *dynamic remapping*. Le *remapping* fait, lui-même, l'objet de nombreuses recherches et différentes théories s'affrontent.

Il existe d'une part des mécanismes proposant une activité se déplaçant dans la carte (*moving hill*). Ce type de solution nécessite généralement des connexions récurrentes afin de maintenir et de déplacer ces activités.

D'autre part, il existe également des mécanismes proposant un transfert d'activité entre plusieurs cartes (*single-shot*). Ceci permet d'introduire un déplacement pendant le transfert et nécessite généralement un réseau *feedforward* de plusieurs couches (voir par exemple [Pouget and Sejnowski, 1995] pour une rapide revue).

Dans notre modèle, le *remapping* est de type *single shot*, mais notre implémentation, ici, est purement ad hoc. L'implémentation d'un modèle incluant un *remapping* de manière neuronale peut faire l'objet de travaux futurs.

Dans une certaine mesure, la règle temporelle est également implémentée dans notre modèle de manière minimale puisque des stimuli temporellement disjoints ne s'additionneront pas. Cette règle temporelle se caractérise par une fenêtre de temps qui se limite ici à la dynamique très simple des neurones intégrateurs à fuite et pourrait également faire l'objet de travaux supplémentaires.

Coordination de mouvements Comme nous l'avons vu en section 5.4, le SC n'est pas seulement impliqué dans la génération de saccades, mais également dans la génération de mouvements de la tête, du bras et du corps. Pour notre modèle, nous nous sommes contentés d'une coordination ad-hoc qui s'est avérée suffisante dans les tâches que nous avons considérées. Toutefois un modèle permettant une meilleure coordination pourrait permettre une meilleure stabilité de la vision pendant les mouvements contrôlés de la tête. De même, pour des raisons de temps, nous n'avons pas pu effectuer de coordination entre le réflexe vestibulo-oculaire (VOR) – permettant de stabiliser le regard lors de perturbations – et les saccades volontaires, ce qui constitue un handicap important auquel il conviendrait de remédier dans le futur.

Navigation Les expériences comportementales sur le robot mobile montrent que ce système peut avoir un intérêt dans des tâches de navigation. En effet on peut imaginer que le comportement d'orientation dirigé vers un objet puisse être assimilé à une stratégie de navigation telle que la stratégie *taxon* permettant de se diriger vers un but à partir des entrées sensorielles [O'Keefe and Nadel, 1978] (comme par

exemple dans [Sheynikhovich et al., 2009]). La stratégie *taxon* est probablement la forme la plus primitive de navigation, mais c'est également un comportement fondamental [O'Keefe and Nadel, 1978]. Chez le rongeur, il semble qu'au moins trois régions principales soient impliquées dans le fonctionnement de cette stratégie : le cortex pariétal postérieur, le noyau caudé et le colliculus supérieur [Redish, 1999]. Cependant ce système est encore mal compris et peu de modèles neuro-mimétiques existent comparativement à la stratégie « locale » nécessitant une carte cognitive (voir par exemple [O'Keefe and Nadel, 1978, Touretzky and Redish, 1996, McNaughton et al., 1996]).

De plus, une expérience telle que l'expérience trimodale montre qu'il doit être également possible d'utiliser ce système en entrée d'une carte cognitive. En effet, la perception d'indices multi-sensoriels (et donc potentiellement plus robustes et stables), ainsi que leur caractérisation au niveau cortical, pourraient être utilisées pour la construction d'une carte cognitive et donc pour la reconnaissance de lieux (pour une revue des stratégies de navigation voir [Trullier et al., 1997, Filliat and Meyer, 2003, Meyer and Filliat, 2003]).

Les contraintes de temps et d'espace inhérentes à ce travail de thèse nous ont seulement permis de montrer que Psikharpax était capable de visiter successivement plusieurs lieux distingués par des combinaisons différentes d'amers visuels, auditifs et tactiles et de s'arrêter lorsqu'il arrivait en un lieu caractérisé par « la » bonne combinaison sensorielle, préalablement apprise. On peut raisonnablement supposer que, au-delà des surprises que toute expérimentation robotique ne manque pas de générer, il sera relativement aisé d'étendre les capacités de navigation actuelles de Psikharpax et de lui permettre de se déplacer dans un environnement inconnu en incluant dans la carte cognitive qu'il construira [Lachèze, 2008] des lieux caractérisés par plusieurs modalités sensorielles. Ainsi, il pourra reconnaître des lieux même en l'absence de lumière ou même lorsqu'aucun des amers impliqués dans cette reconnaissance ne sera assez saillant pour permettre une telle reconnaissance à lui tout seul.

Représentation multimodale Nous avons utilisé des cartes auto-organisatrices séparées pour catégoriser les *features* de chaque modalité. Cette séparation a été choisie en raison des données neurophysiologiques indiquant que l'intégration multi-sensorielle au niveau du SC (chez le chat) est dépendante de l'activité de région corticales associatives (multi-sensorielles) tout en impliquant uniquement les neurones mono-sensoriels de ces régions [Wallace et al., 1993]. Ainsi les différentes SOM peuvent être vues comme constituant ces neurones mono-sensoriels. Cependant il n'a pas été exploré la possibilité d'utiliser une structure « associative » de niveau supérieur entre ces SOM. Par exemple, une hiérarchie de SOM (une SOM multi-sensorielle prenant en entrée les SOM mono-sensorielles) permettrait sans doute de produire une réelle représentation multi-sensorielle des objets et de les apprendre. Il serait alors possible d'influencer le comportement à partir de cette représentation de haut niveau en provoquant la recherche active d'un objet. De même que les neurones

des SOM mono-sensorielles permettent d'influencer les canaux des caractéristiques, de même les neurones de cette SOM multi-sensorielle pourraient influencer ceux des SOM mono-sensorielles. On obtiendrait alors une attention *top-down*. Ce problème fera certainement l'objet de travaux ultérieurs.

Apprentissage au niveau du SC Nous avons également utilisé des poids de projection permettant d'ajuster les importances relatives de chaque modalité. Ces poids ont été fixés lors de nos expériences mais il serait également possible de les apprendre ou de les faire varier en fonction du contexte. Cette méthode pourrait permettre d'ajuster les intensités relatives de chaque modalité, par exemple en baissant le poids de la vision et en augmentant ceux de l'audition et du toucher dans l'obscurité.

De même, la taille des champs récepteurs pour chacune des cartes mono-sensorielles a été fixée de façon ad-hoc. La largeur des activités gaussiennes dans ces cartes représente d'une certaine manière la fiabilité de la modalité correspondante. Ces champs récepteurs pourraient également être appris.

Suppression intra-modale Le comportement de suppression intra-modale (*modality specific suppression*) apparaît lorsque deux stimuli de même modalité se projettent sur la même zone. Lorsqu'un tel événement se produit l'activité résultante n'est pas amplifiée mais réduite [Stein and Meredith, 1993]. Un tel cas est possible principalement à cause des larges champs récepteurs du SC et est probablement utile à la séparation des stimuli proches. Ce comportement est généralement modélisé par une inhibition latérale au niveau du SC mais également par des mécanismes de compétition impliquant des inter-neurones inhibiteurs (comme par exemple dans [Cuppini et al., 2010]) ainsi que dans des implémentations neuronales d'intégration bayésienne (comme par exemple [Patton and Anastasio, 2003]). Notre modèle de SC ne comporte pas d'inhibition latérale et le micro-circuit permettant l'intégration ne comporte pas de mécanisme de compétition. Toutefois de tels mécanismes restent compatibles avec notre modèle puisqu'ils ne nécessiteraient que quelques ajouts de connexions inhibitrices. Une autre possibilité à explorer ultérieurement serait d'impliquer l'inhibition des BG pour générer ce comportement.

Temps de réaction en présence d'un distracteur Nous avons vu que les temps de réaction variaient en présence de stimuli multi-sensoriels ainsi qu'après apprentissage dans la boucle STBS. Cependant, notre modèle produit également une réduction du temps de latence lors de la présence d'un distracteur, alors que le comportement observé chez l'humain et l'animal est normalement opposé [Lévy-Schoen, 1969, Born and Kerzel, 2008]. Ceci s'explique par le fonctionnement du modèle de SC qui utilise l'activité globale de la carte pour déterminer quand déclencher une saccade. Or, comme l'ajout d'un distracteur provoque plus d'activité dans la carte, le temps de réaction se retrouve réduit. Ce fonctionnement permet tout de même à

notre modèle de produire des saccades moins précises, voire des saccades moyennes en présence de distracteurs ce qui est, en revanche, un « bon » comportement. Il est probablement possible de résoudre ce dilemme en ajustant les paramètres des BG afin que ceux-ci soient ralentis. En effet la compétition au sein des BG qui permet la sélection entre les cibles est normalement plus lente si plusieurs cibles sont présentes. Cet effet est ici « absorbé » par la vitesse de réaction des BG, trop rapide par rapport à celle du SC.

MSE asymétrique Il existe certains comportements subtils et encore très mal compris – comme l’effet asymétrique de l’amélioration multi-sensorielle. En effet il apparaît que l’amélioration a lieu lorsque les stimuli coïncident spatialement, mais également lorsque ceux-ci possèdent une disparité particulière [Stein and Meredith, 1993], par exemple, lorsqu’un son est présenté latéralement (temporalement) par rapport à un stimulus visuel. À l’opposé, si le son est médial par rapport à ce stimulus, une dépression a bien lieu. Un tel comportement implique probablement une communication entre les deux colliculi, problème encore largement inexploré.

Sprague effect Une communication entre les deux colliculi est également probablement impliquée dans le *Sprague effect* [Sprague and Meikle, 1965, Sprague, 1966]. Ce terme se réfère au phénomène de restauration des capacités d’orientation visuelle biaisées après une lésion du cortex visuel dans un seul hémisphère – par l’ablation du colliculus supérieur contralatéral ou la section de la commissure entre les deux colliculi. L’interprétation classique de ce phénomène par Sprague (1966) est que le colliculus supérieur reçoit normalement un ensemble « équilibré » d’entrées, incluant des excitations provenant du cortex ipsilatéral et des inhibitions du colliculus contralatéral. La lésion du cortex entraîne alors un déséquilibre de ces entrées avec un surplus d’inhibitions contralatérales pouvant être rééquilibrées par la section de la commissure entre les colliculi. Notre modèle, ne comportant pas de communication entre les colliculi, n’est pas en mesure de reproduire cet effet – ce qui pourrait être une source de travaux ultérieurs.

Discussion générale

Sommaire

6.1 Contributions	125
6.2 Limitations et perspectives	127
6.2.1 Améliorations des modalités développées	127
6.2.2 Traitements sensoriels primaires	127
6.2.3 Importantes améliorations futures	129
6.2.4 Odorat	130
6.2.5 Émotions	131
6.2.6 Capacités cognitives	132

Durant cette thèse, nous nous sommes efforcés de développer trois modalités sensorielles de Psikharpax : le toucher, l'audition et la vision. Toutefois, dans la mesure où ces recherches ont été conduites avec un objectif d'intégration, il ne nous a pas été possible de les étendre davantage dans le temps imparti.

Nous avons également proposé un modèle de fusion multi-sensorielle qui permet de générer des comportements d'orientation, préférentiellement en direction de cibles associées à des récompenses. Ce système s'est avéré efficace dans les tâches considérées mais de futurs ajouts et améliorations sont encore à développer afin de pouvoir générer des comportements plus complexes.

6.1 Contributions

Doté des mécanismes perceptifs que nous avons décrit dans les différentes sections de cette thèse, Psikharpax possède maintenant quelques capacités basiques.

Il lui est possible de « palper » les objets et obstacles qu'il rencontre afin de les éviter ou de les longer grâce à ses vibrisses. Il est également capable d'en extraire les textures et les orientations afin de les reconnaître. Cette aptitude se trouve être admirablement développée chez le rat et son mode de vie nocturne. Notre travail sur les vibrisses permet donc d'équiper l'animat d'une partie de ces capacités tactiles.

Cependant, percevoir le monde uniquement par le contact peut s'avérer insuffisant, voire dramatique, lorsque l'on rencontre par exemple un prédateur. Pouvoir également entendre et localiser les sons provoqués par les événements alentours apparaît donc indispensable à la survie d'un rat. Aussi notre travail a-t-il tenté de reproduire cette faculté offerte par l'audition. Psikharpax est maintenant capable

de percevoir d'où proviennent différentes sources sonores distantes et également, dans une certaine limite, de les identifier.

Enfin, la vision constitue une modalité d'importance primordiale qui, malgré ses défauts (sensibilité aux occlusions ainsi qu'aux variations de luminosité par exemple), s'avère extrêmement efficace. Sa précision pour la localisation et sa richesse descriptive permettent de compléter avantageusement les modalités tactile et auditive. Chez le rat, si la vision n'égale pas celle du primate par exemple en terme d'acuité, elle lui permet toutefois de percevoir très finement les mouvements et de se repérer grâce à des amers. Nous avons donc développé un sens visuel relativement basique mais permettant la localisation et l'identification de formes simples (sur la base de la couleur et de l'orientation).

En plus de percevoir l'environnement, notre travail permet également à Psikharpax de *réagir* aux stimuli. Comme nous l'avons vu, le colliculus supérieur – structure sous-corticale très importante chez de nombreux animaux – forme une boucle sensori-motrice dont la fonction principale consiste à orienter l'attention de l'agent en direction d'événements particuliers. Son implication dans la génération de saccades visuelles n'est donc que la manifestation la plus évidente de cette fonction générale. De ce point de vue, il n'est pas surprenant que cette structure constitue également un centre important d'intégration multi-sensorielle. C'est pourquoi notre travail dans ce domaine a aussi consisté à reproduire certains phénomènes d'intégration mesurés au sein du SC et permettant d'améliorer de manière significative les capacités de détection de l'animat.

L'orientation de l'attention nécessite une étape importante. En effet les événements survenant sont souvent multiples et il convient alors de prendre une *décision* afin de sélectionner quels stimuli seront pris en compte à un instant donné. Cette décision se trouve être effectuée par une autre structure d'une grande importance, les ganglions de la base. Nous avons donc adjoint au SC des boucles de sélection corticales (traitant des « caractéristiques » et modulant les phénomènes d'intégration) et sous-corticales (traitant les informations spatiales) à travers les BG permettant de résoudre certains conflits se produisant lorsque plusieurs objets apparaissent simultanément. Avec un tel système Psikharpax se voit ainsi capable de s'orienter vers les stimuli les plus *saillants*.

Enfin, il se trouve que les BG sont également le siège d'un type d'apprentissage particulier. L'*apprentissage par renforcement* est le mécanisme à la base de l'acquisition de connaissances par essais-erreurs et se trouve sans doute présent chez tous les vertébrés [Redgrave et al., 1999]. Il semble donc « logique » qu'un tel mécanisme soit implémenté au sein d'une structure responsable de la prise de décision, permettant ainsi d'apprendre au cours du temps à optimiser celle-ci. Notre implémentation de l'algorithme d'apprentissage par renforcement « Acteur-Critique » dans les BG ajoute ainsi à l'animat la possibilité d'adapter ses choix en fonction de leurs conséquences. Il est dès lors capable de renforcer les décisions lui apportant une récompense tout en atténuant celles associées à une punition (ou à l'absence de récompense) et donc, d'une certaine manière, à apprendre ce qui est « bon » et ce qui

est « mauvais » pour lui. Cette aptitude est à l'évidence de nature à améliorer ses chances de survie.

6.2 Limitations et perspectives

Notre travail permet donc à Psikharpax de posséder certaines capacités de réaction face à son environnement. Toutefois les modalités sensorielles ainsi développées restent incomplètes. De plus aucune aptitude cognitive de haut niveau ne permet de produire d'actions volontaires. Afin d'obtenir un animat plus semblable à un rat réel, de nombreux travaux restent donc à accomplir.

6.2.1 Améliorations des modalités développées

Nous avons évoqué précédemment les capacités tactiles offertes par les vibrisses. Or celles-ci sont « statiques » alors que les vibrisses du rat sont mobiles et agitées d'un mouvement oscillatoire de *whisking*. Notre système n'empêche cependant pas l'exploration active de l'environnement puisqu'il reste possible de bouger la tête et le corps pour scruter les objets. Toutefois, comme nous l'avons discuté en section 2.5, la possibilité de réorienter les vibrisses à chaque instant serait susceptible d'améliorer et d'élargir le champ des comportements possibles. De même, nous avons précédemment discuté les limites du système quant à la perception des formes, ce qui constitue une importante limitation de l'implémentation actuelle.

En ce qui concerne l'audition, nos travaux ont rendu possible la localisation de l'origine des sons de manière efficace dans les tâches considérées. Cependant, ce système n'étant pas capable d'estimer l'élévation des sources, nous nous sommes limités à un environnement dans lequel celles-ci ne se superposent pas en hauteur, réduisant ainsi la possibilité d'évoluer dans un environnement naturel. Ici encore, la capacité à reconnaître des « formes » sonores reste un aspect très limitant également discuté en section 3.4.3.

Enfin, la vision que nous avons développé souffre de nombreuses restrictions. En effet, nous nous sommes contentés de définir un système permettant de percevoir les zones très colorées ainsi que leur orientation principale. Psikharpax étant aveugle à tous autres stimuli visuels, un tel système nous oblige à ne le laisser évoluer que dans un environnement relativement contrôlé. Toutefois cette limitation, due aux contraintes computationnelles, reste encore relativement « simple » à lever.

6.2.2 Traitements sensoriels primaires

Lien tactile/audition Nous avons proposé un modèle d'encodage de l'information commun à l'audition et au toucher. Ce modèle s'est avéré efficace dans des tâches de reconnaissance de textures (tactiles et auditives). À notre connaissance, aucun modèle de ce type unifiant les sens tactile et auditif n'a été précédemment proposé, même si le lien entre ces deux modalités est pressenti depuis de nombreuses années [Lederman, 1979]. De récents travaux en biologie accréditent cette idée en

montrant l'existence d'une région corticale « supramodale » traitant les informations spectrales [Yau et al., 2009b]. La nature vibratoire similaire des signaux tactiles et auditifs (du moins pour ce qui est de la texture) peut expliquer une certaine convergence évolutive menant au recrutement d'une structure corticale commune pour ces deux modalités. De même, la théorie très discutée (hypothèse de résonance) selon laquelle la matrice vibrissale, à travers la sélectivité fréquentielle des vibrisses, agirait de manière similaire à la cochlée en décomposant les signaux tonotopiquement témoigne en ce sens (cf. Section 2).

Lien vision/tactile Nous avons également utilisé des informations de type bords orientés comme premier pas vers la reconnaissance de formes tactiles. En effet nous avons évoqué les capacités des tonneaux du cortex à tonneaux, à encoder les orientations de déflexion [Bruno et al., 2003, Andermann and Moore, 2006], ainsi que ses capacités à intégrer des informations sur toute la matrice [Jacob et al., 2008]. Ce fonctionnement peut faire penser aux colonnes d'orientations du système visuel. Ainsi il est peut être possible de voir une ressemblance entre le cortex à tonneaux et le cortex visuel, et d'imaginer des traitements similaires entre ces deux modalités, ce qui ouvrirait une voie commode pour l'intégration multimodale. De plus, certaines données semblent indiquer l'activation du cortex visuel pendant la discrimination d'orientations tactiles [Zangaladze et al., 1999, Sathian, 2002], accréditant encore cette idée.

Traitements génériques ? Les liens « computationnels » que nous avons observés entre les différentes modalités pour les traitements sensoriels primaires nous indiquent une possible généralité de ces traitements. En effet, si l'on considère l'aspect essentiellement spatio-temporel des représentations sensorielles (cartes somatotopiques, rétinotopiques ou tonotopiques), il n'est pas absurde de penser que de mêmes traitements puissent s'y appliquer. Si ces cartes possèdent une cohérence spatiale – c'est à dire que les stimuli n'y sont pas représentés de manière incohérente (l'information spatiale y est conservée) – et une cohérence temporelle – l'ordre des événements y est conservé –, il doit être possible de trouver des fonctions « génériques » permettant d'extraire des informations de ces cartes. Par exemple les bords existent trivialement dans une image visuelle, mais également dans une image tactile (lorsque nous rencontrons le bord d'une table en l'explorant de notre main) et, peut être également, dans une image auditive – un bord dans une représentation tonotopique pouvant apparaître pour un son de fréquence fixe ou une montée continue. À ces bords on peut donc attribuer une orientation dans la carte. La même analogie pourrait être faite avec les textures. D'une manière plus générale, ces fonctions génériques semblent être proches des filtres de Gabor (spatialement ainsi que temporellement), ceux-ci paraissant modéliser relativement bien les cellules simples du cortex visuel V1 [Daugman, 1980]. Une telle idée n'implique pas que les informations sensorielles soient homogènes, mais seulement que leurs traitements soient similaires. Il est également possible que des traitements génériques interviennent au

niveaux supérieurs (cellules complexes et hypercomplexes).

Ce mécanisme de traitements génériques pourrait expliquer les interactions entre modalités au niveau des cortex sensoriels primaires. Par exemple l'extraction de bords orientés pour une perception tactile pourrait alors être effectuée par le cortex visuel. Cependant ce phénomène d'interaction peut également être dû à une facilitation entre modalités (similaire à la MSE observée dans le SC), ou bien à une co-activation de plus haut niveau (par exemple entendre une voie familière provoque la vision du visage associé). Mais n'avons-nous pas le réflexe de fermer les yeux et d'imaginer en image l'objet que nous explorons de nos mains ? Peut être qu'ainsi les informations tactiles sont plus facilement traitées par le cortex visuel.

Un autre phénomène intéressant et aujourd'hui bien connu est la capacité améliorée de perception non-visuelle chez les personnes aveugles. Ce phénomène peut être expliqué en partie par le recrutement du cortex visuel pour la perception auditive ou tactile. Par exemple le cortex visuel est activé lors de tâches de discrimination de sons [Kujala et al., 1995], ainsi que lors de la lecture en Braille [Sadato et al., 1996]. Il y a, bien entendu également, les fameuses expériences de substitutions sensorielles de Paul Bach-y-Rita, comme la perception visuelle par la sensation tactile au niveau du dos [Bach-y Rita et al., 1969] (pour une rapide revue de ces expériences voir [Bach-y Rita, 2004]). Ces phénomènes impliquent forcément une grande plasticité cérébrale au niveau du cortex, mais peut être sont-ils également simplifiés par la nature générique des traitements à effectuer ?

Ce principe suppose que le processus évolutif ait produit des structures capables de traitements génériques et interchangeable plutôt que des traitements spécifiques à chaque modalité. Cette idée ne semble pas absurde dans la mesure où il est probablement plus économe de produire une structure générique réutilisable dans tout le cortex. Plusieurs théories permettent d'expliquer ce genre de généralité à travers les colonnes corticales [Szentagothai, 1975, Mountcastle, 1978, Hubel and Wiesel, 1977, Burnod, 1989, Alexandre et al., 1991]. La possibilité d'en tirer des modèles de traitement sensoriels génériques reste à explorer.

6.2.3 Importantes améliorations futures

Finalement, dans le cadre de notre contribution à la perception de Psikharpax, nous nous sommes limités aux modalités sensorielles les plus faciles à reproduire. Or, il se trouve que le sens dominant chez le rat – l'odorat – est également le moins connu et le plus difficile à reproduire.

De même les comportements possibles par nos travaux ne peuvent être que réactifs face à l'environnement. Ici un contrôle plus cognitif de ces comportements permettant de les diriger par une influence *top-down* est donc nécessaire. De plus, ce contrôle cognitif devrait être dirigé par des motivations et émotions permettant à l'animat de réguler ses états internes.

6.2.4 Odorat

Alors que le bulbe olfactif est presque inexistant chez l'homme, l'environnement olfactif est sans doute d'une richesse insoupçonnée pour les autres animaux. Le rat en particulier utilise son odorat pour reconnaître des lieux (voir par exemple [Lavenex and Schenk, 1996, Lavenex, 1998]), des objets ou des congénères, pour trouver sa nourriture, pour éviter ses prédateurs. Plus généralement, on trouvera dans [Slotnick, 2001] une revue des performances cognitives dont il est capable grâce à son odorat. Il a, en particulier, été montré que, pour de nombreuses tâches cognitives telles que les *learning sets* de Harlow¹ [Harlow, 1949], les primates exhibent d'excellentes performances alors que les rongeurs leur sont clairement inférieurs. Cependant, lorsque ces derniers utilisent leur olfaction, leurs résultats s'améliorent considérablement [Jennings and Keefer, 1969].

La sensation des odeurs est produite par l'interaction des molécules odorantes avec des récepteurs spécialisés de l'épithélium olfactif situé sur le plafond de la cavité nasale. Le fonctionnement de cette interaction non chimique entre les molécules odorantes et les récepteurs olfactifs formés de protéines complexes est encore aujourd'hui un mystère. Il n'est pas non plus connu quelle grandeur physique est reliée à la « qualité » des odeurs c'est-à-dire ce qui détermine le potentiel odorant d'une molécule. Est-ce dû à sa structure, à sa vibration ou à d'autres caractéristiques ?

Il existe tout de même quelques technologies permettant de « mesurer » une relativement large gamme d'odeurs, mais toutes restent encore très contraignantes en terme de procédé (par exemple le dépôt d'un échantillon dans un compartiment isolé), d'espace (occupant généralement une table entière) ainsi que de coût. De plus, leurs performances sont très loin de celles du vivant². Ici encore, à moins d'accepter de réduire l'environnement à un faible champ olfactif, l'intégration de l'odorat sur un robot nécessite de nombreuses avancées techniques (pour une revue des procédés disponibles voir [Pearce et al., 2003]).

Un éventuel modèle Il s'avère que les informations olfactives sont encodées selon des motifs spatiaux. Quelques travaux se sont précédemment intéressés à la modélisation neuronale du bulbe olfactif appliquée à des capteurs réels (voir par exemple [Ambard, 2009]). Sur la base de ce genre de travail il serait alors possible de développer un modèle simplifié du sens olfactif (ainsi que du goût très similaire).

Les informations du bulbe olfactif pourraient alors se projeter, selon des voies corticales et sous-corticales, avec d'une part un lien vers un modèle du cortex olfactif, et d'autre part vers un modèle de l'hypothalamus et de l'amygdale.

Nos connaissances sur la fonction exacte du cortex olfactif (cortex piriforme et entorhinal) sont encore assez limitées mais il est raisonnable de penser que celui-ci est impliqué dans la reconnaissance des odeurs. Ainsi dans une première approche

1. Méthode classique d'évaluation de l'intelligence où il est question de découvrir et d'apprendre les règles d'un jeu sur la base de la discrimination d'indices visuels.

2. Un très bon « nez » en parfumerie peut être capable d'identifier de l'ordre de 10 000 substances différentes, quand un système artificiel de taille raisonnable peut en identifier une dizaine.

nous pourrions utiliser ici un simple système permettant d'apprendre les odeurs. Le résultat de cette classification pourrait ensuite être utilisé en entrée d'un modèle de l'hippocampe permettant de mémoriser l'odeur en l'associant à son contexte.

D'autre part une entrée des informations olfactives dans un modèle très simple de l'hypothalamus permettrait de déclencher des comportements purement homéostatiques de type alimentaires par exemple (en provoquant la faim). L'amygdale serait elle ici responsable d'associer une valence émotionnelle à l'odeur perçue.

6.2.5 Émotions

Les émotions contribuent également de manière importante aux comportements des animaux. Jusqu'ici peu de chercheurs se sont intéressés à ces phénomènes et encore moins ont tenté de les simuler. Il semble que l'*émotion* a été traditionnellement écartée du champ des sciences cognitives et des neurosciences à cause de sa connotation « irrationnelle » [Trapp et al., 2003]. Cependant les récents travaux de neurologues, comme Antonio Damasio et Joseph LeDoux par exemple, semblent montrer que les émotions sont, en fait, indispensables à la prise de décision [Damasio, 1994, LeDoux, 2000] – ce qui tend à les remettre au cœur des processus cognitifs.

Comme nous l'avons vu précédemment pour l'odorat, l'utilisation d'un modèle de l'amygdale permettrait dans une certaine mesure d'ajouter des émotions comme la peur à notre architecture de contrôle.

Ce modèle d'amygdale pourrait agir selon deux voies, une rapide « directe » prenant en entrée les informations sensorielles provenant du relais thalamique (ou du cortex olfactif), et une voie plus lente passant d'abord par le cortex (pour un traitement plus détaillé des entrées sensorielles) et permettant éventuellement d'atténuer la réponse de peur. Celle-ci se manifestant par une modification de l'état interne de l'agent.

D'une manière plus générale il apparaît donc que l'amygdale se trouve impliquée dans le *conditionnement pavlovien* qui permet d'établir une réponse de peur à des stimuli prédisant un « choc » (punition). Un modèle d'amygdale tel que nous l'avons rapidement décrit permettrait de produire ce genre de comportement. De plus ce mécanisme d'apprentissage est relativement proche du *conditionnement opérant* que nous avons mis en place dans nos travaux sur les ganglions de la base et forme également une sorte de mémoire permettant d'associer une *valence* émotionnelle à un ensemble de perceptions. Cependant, le conditionnement opérant est lui de nature à déclencher un comportement permettant d'éviter la punition plutôt que de déclencher une peur. Un modèle de l'amygdale serait donc ici complémentaire de nos travaux.

De même cette structure semble aussi impliquée dans la régulation et la modulation de plusieurs autres fonctions comme par exemple l'attention. Ici encore il existe un lien intéressant avec nos travaux puisque les noyaux centraux de l'amygdale possèdent une influence indirecte sur le striatum à travers ses connexions vers la substance noire compacte (SNc). Or les neurones de la SNc projettent des connexions dopaminergiques vers le striatum et sont donc de nature à influencer la sélection de

cibles (pour une revue voir [Gallagher and Holland, 1994]). Il est donc tout à fait possible de concevoir une modèle permettant une modulation émotionnelle sur les phénomènes d'attention, ce qui pourrait être avantageux à un animat.

Perception de l'émotion Nous avons vu qu'une émotion pourrait être générée par la modification d'un état interne de l'agent. Toutefois il serait peut être possible d'aller plus loin encore en reprenant les théories perceptives ou somatiques de l'émotion, héritières des idées de James (1884) et Lange (1885) et développées plus récemment par d'autres (voir par exemple [Damasio, 1994, Panksepp, 1998, Prinz, 2004]).

On pourrait alors ne pas nous contenter de seulement modifier des variables internes (taux de peur ou de faim par exemple) mais de modifier réellement l'état physique de l'agent. La peur pourrait alors se traduire par une augmentation dans le voltage des commandes motrices (entraînant alors des mouvements plus rapides et moins bien contrôlés), ce qui produirait également un plus grand échauffement des actuateurs.

De même la faim pourrait être représentée au contraire par une baisse du voltage et du courant et donc de provoquer des mouvements plus lents et moins puissants.

Ces changements d'état « physiologiques » pour l'animat seraient alors perceptibles directement à travers certains capteurs et indirectement par la modification des réponses motrices. C'est alors la représentation de cette perception *intéroceptive* et *proprioceptive* qui formerait l'état interne. Le fonctionnement de l'émotion reposerait donc sur la perception.

Ceci placerait alors les émotions au niveau des processus homéostatiques, entraînant des modifications réelles et perceptibles de l'état de l'agent nécessitant une action afin de rétablir celui-ci dans une zone de confort. On tirerait également partie de « l'incarnation » de l'agent, celle-ci façonnant et étant façonnée par l'environnement (se rapprochant alors de l'*énaction* chère à Varela [Varela et al., 1999]).

Enfin ces représentations mentales des émotions pourraient être utilisées pour influencer la prise de décision dans un modèle du cortex préfrontal.

6.2.6 Capacités cognitives

Comme nous venons de le discuter, les émotions et leurs effets sont de nature à influencer certaines fonctions cognitives de haut niveau, fonctions malheureusement absentes dans les modèles développés dans le cadre de cette thèse.

A ce stade, il est clair que la possibilité d'orienter l'attention de Psikharpax en direction d'un but précis, dépendant de ses motivations, permettrait d'atteindre un premier niveau de cognition qui, se plaçant au-dessus de notre modèle attentionnel, l'influencerait de manière *top-down*. Il deviendrait alors possible de déclencher des comportements « volontaires » et non plus seulement réactifs.

Ici une structure comme le cortex préfrontal, capable de répondre à une sensation de peur (provoquée par la perception d'un miaulement de chat par exemple) par la planification d'une réponse adaptée (comme aller se cacher dans son nid), pourrait

tirer partie de notre modèle. Ce cortex préfrontal comporterait alors la capacité d'associer des entrées sensorielles et émotionnelles à un but, et ainsi à planifier les étapes menant à ce but en prenant les décisions nécessaires.

La réponse comportementale inclurait alors une orientation de l'attention vers les stimuli associés au chat et vers ceux associés au nid en ignorant tout le reste. La planification elle-même pourrait être en rapport avec le chemin à parcourir jusqu'au nid en fonction du lieu présent (en étendant par exemple le modèle décrit en [Martinet et al., 2008]). Il faudrait alors disposer également de capacités de navigation permettant l'élaboration préalable d'une carte cognitive de l'environnement, en reprenant par exemple les travaux sur *Psikharpax* développés dans [Lachèze, 2008] et dans lesquels les représentations non-spatiales de notre modèle seraient utilisées. Il faudrait également pouvoir sélectionner, à tout moment pendant le trajet, la meilleure action à effectuer (comme, par exemple, attraper de la nourriture à proximité ou continuer à fuir) en intégrant les travaux décrits dans une autre thèse [Girard, 2003]. Et enfin, tout au long du parcours selon le contexte, il faudrait pouvoir changer de stratégie de navigation (par exemple abandonner la planification pour une simple orientation directe vers le nid quand celui-ci devient visible) comme proposé dans [Khamassi, 2007, Dollé et al., 2010] où, ici encore, la perception et les capacités d'orientation de notre modèle pourraient être intégrées.

Une fois arrivé dans l'environnement rassurant de son nid, le danger disparu, la sensation de peur pourra alors diminuer et celle de la faim prendre le dessus pour déclencher une nouvelle action.

Conclusions

Les travaux présentés ici constituent un point de départ essentiel pour le développement du projet Psikharpax. Les différents systèmes perceptifs que nous avons développés, ainsi que les modèles d'extraction de caractéristiques associés, peuvent tout à fait être utilisés indépendamment et faire l'objet de travaux supplémentaires. Il reste cependant de nombreux points à investiguer dans chacune des modalités abordées, problèmes qui n'ont pas pu être traités ici pour des raisons évidentes de temps, mais également parce que nous ne les avons pas jugé cruciaux dans l'objectif de cette thèse.

Le système tactile que nous avons mis au point nous a permis de réaliser des tâches intéressantes pour le domaine de la robotique. Les capacités tactiles sont encore très peu utilisées en dehors du simple évitement d'obstacles. Nous avons montré qu'il était aussi possible de reconnaître les textures de manière robuste sur un robot mobile. Nous avons également proposé une méthode d'extraction de caractéristiques sur la forme des objets. Ce travail préliminaire semble assez prometteur et sera poursuivi. La combinaison de ces informations pourrait, par exemple, servir à caractériser l'état du terrain et à adapter le comportement de locomotion en conséquence (si le terrain est lisse et glissant ou s'il est très rugueux et accidenté par exemple). Ce système peut également être utilisé pour la navigation et plus particulièrement pour la reconnaissance de lieux. Bref, l'information tactile pourrait être avantageusement utilisée en complément d'autres senseurs.

De même, il est possible que nos résultats sur le traitement des textures inspiré de la biologie contribuent au débat d'actualité entre biologistes au sujet du rôle des propriétés mécaniques des vibrisses, notamment de leurs fréquences de résonance.

Le système auditif proposé bénéficie de notre implémentation robotique et s'avère peu coûteux d'un point de vue computationnel. L'utilisation de pavillons, même simples, de manière active semble résoudre certains problèmes de localisation. De même, les méthodes de localisation et de séparation de sources que nous avons proposées s'avèrent efficaces et également peu gourmandes en calculs. L'utilisation de tels systèmes auditifs est relativement peu répandue en robotique mais devrait s'étendre, notamment dans le cadre de la robotique de service – où l'interaction vocale avec l'humain est nécessaire (et donc sa localisation).

Ici également, les méthodes utilisées pour l'extraction des caractéristiques sonores, similaires à celles que nous avons utilisées pour les vibrisses, pourraient fournir des pistes intéressantes pour la biologie où la question de l'encodage des informations

auditives se pose encore.

Le système auditif de Psikharpax est en cours de développement et fait partie de la thèse de Mathieu Bernard.

Nous avons proposé un modèle de générateur de saccades intégrant le colliculus supérieur et les ganglions de la base. Ce modèle a permis de reproduire des comportements élémentaires tels que les saccades vers une cible, la fixation sur un indice en ignorant les distracteurs et la saccade vers une cible après disparition d'un indice de fixation. Il a également permis de reproduire des comportements plus complexes, comme déclencher des saccades selon des caractéristiques spatiales ou non-spatiales, notamment grâce au mécanisme d'apprentissage par renforcement. Aucun des précédents travaux dans ce domaine n'incluait l'ensemble de ces mécanismes et notre modèle génère des prédictions testables en biologie telles que la dominance spatiale de l'apprentissage et la possibilité d'effectuer des saccades uniquement grâce aux structures sous-corticales.

Ainsi, dans la mesure où nos travaux fournissent des briques de bases probablement communes à de nombreux animaux – et bien que des améliorations soient encore nécessaires pour produire un modèle « complet » de génération de saccades – notre travail contribue sans doute utilement au domaine des neurosciences computationnelles.

Enfin nous avons étendu le modèle générateur de saccades visuelles aux modalités tactiles et auditives. Cette intégration multi-sensorielle est basée sur un micro-circuit très simple permettant de reproduire les principaux phénomènes d'intégration observés dans le colliculus. Ici encore, grâce à l'intégration des ganglions de la base, nous proposons une interprétation nouvelle des comportements optimaux observés chez l'humain, ceux-ci apparaissant alors comme le résultat d'une prise de décision optimale, plutôt que comme celui d'une intégration optimale. Ce modèle entraîne également quelques prédictions testables comme la possibilité d'inhiber une cible, même multimodale, si celle-ci n'est pas pertinente du point de vue de la récompense, ainsi qu'un possible mécanisme permettant de produire des « saccades expresses ». A ce titre aussi, notre travail contribue aux neurosciences computationnelles.

Finalement, si les capacités perceptives, ainsi que la boucle sensori-motrice que nous avons modélisée, semblent indispensables à la « survie » d'un robot-rat, il reste encore beaucoup de travail pour rendre Psikharpax complètement autonome et adaptatif. Diverses capacités de navigation sont aujourd'hui en cours de test sur cette plateforme [Caluwaerts, 2010]. Un système motivationnel reste encore à développer, ainsi que l'intégration des capacités de perception, navigation et sélection de l'action. Ces systèmes lui permettront déjà d'exhiber des comportements de survie basiques comme d'explorer l'environnement ou d'apprendre à se localiser et à trouver sa nourriture tout en évitant les zones dangereuses. De précédentes thèses contribuant au projet Psikharpax ont été effectuées sur la sélection de l'action appliquée à la

navigation [Girard, 2003, Khamassi, 2007]. Des travaux d'intégration d'un système visuel et d'une architecture de contrôle incluant des capacités de navigation ont également été effectués sur une plateforme mobile [Lachèze, 2008], nous rapprochant encore de notre objectif.

Un effort supplémentaire d'intégration de ces différents travaux et, comme précédemment discuté, l'ajout de contrôles cognitifs *top-down* avec la possibilité d'exprimer des émotions, devrait permettre à un animat d'exhiber des comportements plus complexes se rapprochant de ceux du rat réel. Peut être observera-t-on par exemple dans un avenir proche notre animat s'aménager son propre nid dans un lieu de son choix ou même cacher une réserve de nourriture en prévision d'une éventuelle disette. On pourra alors se poser la question de son niveau d'*intelligence*. A l'évidence, le projet Psikharpax a encore une longue vie devant lui. . .

Paramètres

A.1 Paramètres du modèle de SC

Sur la base du modèle décrit dans [Tabareau et al., 2007] ajusté pour utiliser une géométrie linéaire.

TABLE A.1 – Paramètres du modèle de SC

τ	5ms	τ_{Sat}	100ms	t_0	70ms
ε_{OPN}	100	ε_{trig}	400	ε_{stop}	200
w_{Vis}^{LLB}	0.05	w_{OPN}^{Mot}	40	w_{OPN}^{BN}	40
w_{Mot}^{Int}	0.05	w_{Sat}^{Mot}	40	w_{BN}^{TN}	0.05
w_{BN}^{MN}	1.52	w_{MN}^{θ}	4.07		

A.2 Paramètres du modèle de BG

Sur la base du modèle décrit dans [Girard et al., 2008]¹.

TABLE A.2 – Paramètres du modèle de BG dans la boucle CBTC pour 16 canaux (*features*).

N	16	τ	40ms	τ_{STN}	5ms	τ_{FS}	5ms	τ_{FC}	80ms
τ_{TH}	5ms	τ_{TRN}	5ms	γ	0.2	w_{GPe}^{D2}	0.5	w_{D2}^{GPe}	0.4
w_{GPe}^{D1}	0.5	w_{D1}^{GPe}	0.4	w_{GPe}^{FS}	0.05	w_{FS}^{D1}	0.5	w_{FS}^{D2}	0.5
w_{STN}^{GPe}	0.03	w_{GPe}^{STN}	0.01	w_{GPe}^{GPei}	0.03	w_{STN}^{GPei}	0.03	w_{D1}^{GPei}	0.4
w_{TRN}^{TH}	0.35	w_{TH}^{TRN}	0.35	w_{FC}^{TH}	0.6	w_{TH}^{FC}	0.6	w_{FC}^{TRN}	0.35
w_{GPei}^{TH}	0.18	w_{FC}^{STN}	0.8	w_{FC}^{D1}	0.1	w_{FC}^{D2}	0.1	w_{FC}^{FS}	0.01
I_{D1}	-0.1	I_{D2}	-0.1	I_{STN}	0.3	I_{GPei}	0.3	I_{GPe}	0.3
$w_S^{D1/D2}$	0.9	w_S^{FS}	0.09						

Pour la boucle STBS la position du thalamus est changée comme décrit en 4.4.1. Le poids de projection de l'inhibition des BG vers le SC : $w_{BG}^{SC} = 3.0$

1. Disponible sur ModelDB <https://senselab.med.yale.edu/modeldb/default.asp>

TABLE A.3 – Paramètres du modèle de BG dans la boucle STBS pour 720 canaux.

N	720	τ	40ms	τ_{STN}	5ms	τ_{FS}	5ms	τ_{FC}	80ms
τ_{TH}	5ms	τ_{TRN}	5ms	γ	0.2	w_{GPe}^{D2}	0.6	w_{D2}^{GPe}	0.8
w_{GPe}^{D1}	0.6	w_{D1}^{GPe}	0.0	w_{GPe}^{FS}	0.001	w_{FS}^{D1}	0.1	w_{FS}^{D2}	0.1
w_{STN}^{GPe}	0.0003	w_{GPe}^{STN}	0.0003	w_{GPe}^{GPe}	0.0002	w_{STN}^{GPe}	0.7	w_{D1}^{GPe}	0.8
w_{TRN}^{TH}	0.003	w_{TH}^{TRN}	0.003	w_{FC}^{TH}	0.6	w_{TH}^{FC}	0.0	w_{FC}^{TRN}	0.0
w_{GPe}^{TH}	1.0	w_{FC}^{STN}	1.0	w_{FC}^{D1}	0.1	w_{FC}^{D2}	0.1	w_{FC}^{FS}	0.001
I_{D1}	-0.1	I_{D2}	-0.1	I_{STN}	0.3	I_{GPe}	0.3	I_{GPe}	0.3
$w_S^{D1/D2}$	0.9	w_S^{FS}	0.009						

A.3 Paramètres du modèle de SC multi-sensoriel

TABLE A.4 – Paramètres du micro-circuit du SC décrit en 5.4

W_{VM}	0.6	W_{AM}	0.5	W_{SM}	0.5
W_{VP}	0.1	W_{AP}	0.1	W_{SP}	0.1
W_M	1.0	s	15	p	0.5

Bibliographie

- [Aertsen et al., 1981] Aertsen, A., Olders, J., and Johannesma, P. (1981). Spectro-temporal receptive fields of auditory neurons in the grassfrog. *Biological Cybernetics*, 39(3) :195–209.
- [Ahissar and Knutsen, 2008] Ahissar, E. and Knutsen, P. M. (2008). Object localization with whiskers. *Biological cybernetics*, 98(6) :449–58.
- [Albin et al., 1989] Albin, R., Young, A., and Penney, J. (1989). The functional anatomy of basal ganglia disorders. *Trends in Neurosciences*, 12(10) :366–375.
- [Albin et al., 1995] Albin, R. L., Young, A. B., and Penney, J. B. (1995). The functional anatomy of disorders of the basal ganglia. *Trends in Neurosciences*, 18(2) :63–64.
- [Alexander et al., 1986] Alexander, G. E., DeLong, M. R., and Strick., P. L. (1986). Parallel organization of functionally segregated circuits linking basal ganglia and cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 9 :357–381.
- [Alexandre et al., 1991] Alexandre, F., Guyot, F., Haton, J., and Burnod, Y. (1991). The cortical column : A new processing unit for multilayered networks. *Neural Networks*, 4(1) :15–25.
- [Alvarado et al., 2008] Alvarado, J. C., Rowland, B. a., Stanford, T. R., and Stein, B. E. (2008). A neural network model of multisensory integration also accounts for unisensory integration in superior colliculus. *Brain research*, 1242 :13–23.
- [Alvarado et al., 2007] Alvarado, J. C., Stanford, T. R., Vaughan, J. W., and Stein, B. E. (2007). Cortex mediates multisensory but not unisensory integration in superior colliculus. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 27(47) :12775–86.
- [Ambard, 2009] Ambard, M. (2009). *Influence de l'inhibition synaptique sur le codage de l'information par les cellules mitrales du bulbe olfactif*. PhD thesis.
- [Amedi et al., 2001] Amedi, A., Malach, R., Hendler, T., Peled, S., and Zohary, E. (2001). Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, 4(3) :324–330.
- [Amlôt et al., 2003] Amlôt, R., Walker, R., Driver, J., and Spence, C. (2003). Multimodal visual-somatosensory integration in saccade generation. *Neuropsychologia*, 41(1) :1–15.
- [Anastasio et al., 2000] Anastasio, T., Patton, P., and Belkacem-Boussaid, K. (2000). Using bayes' rule to model multisensory enhancement in the superior colliculus. *Neural Computations*, 12(5) :1165–1187.
- [Anastasio and Patton, 2003] Anastasio, T. J. and Patton, P. E. (2003). A two-stage unsupervised learning algorithm reproduces multisensory enhancement in a neural network model of the corticotectal system. *Journal of Neuroscience*, 23 :6713–6727.

- [Andermann and Moore, 2006] Andermann, M. L. and Moore, C. I. (2006). A somatotopic map of vibrissa motion direction within a barrel column. *Nature neuroscience*, 9(4) :543–51.
- [Andermann et al., 2004] Andermann, M. L., Ritt, J., Neimark, M. A., and Moore, C. I. (2004). Neural correlates of vibrissa resonance : Band-pass and somatotopic representation of high-frequency stimuli. *Neuron*, (42) :451–463.
- [Andersen et al., 1997] Andersen, R. a., Snyder, L. H., Bradley, D. C., and Xing, J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annual review of neuroscience*, 20 :303–30.
- [Andreassi and Greco, 1975] Andreassi, J. and Greco, J. (1975). Effects of bisensory stimulation on reaction time and the evoked cortical potential. *Physiological Psychology*, 3 :189–194.
- [Anwyl, 1999] Anwyl, R. (1999). Metabotropic glutamate receptors : electrophysiological properties and role in plasticity. *Brain research. Brain research reviews*, 29(1) :83–120.
- [Arabzadeh et al., 2004] Arabzadeh, E., Panzeri, S., and Diamond, M. E. (2004). Whisker Vibration Information Carried by Rat Barrel Cortex Neurons. *Journal of Neuroscience*, 24(26) :6011–6020.
- [Arabzadeh et al., 2005] Arabzadeh, E., Zorzin, E., and Diamond, M. E. (2005). Neuronal encoding of texture in the whisker sensory pathway. *PLoS Biology*, 3(1) :e17.
- [Ashby, 1952] Ashby, W. R. (1952). *Design for a brain*. J. Wiley.
- [Avillac et al., 2005] Avillac, M., Deneve, S., Olivier, E., Pouget, A., and Duhamel, J. R. (2005). Reference frames for representing visual and tactile locations in parietal cortex. *Nature Neuroscience*, 8 :941–949.
- [Bach-y Rita, 2004] Bach-y Rita, P. (2004). Tactile sensory substitution studies. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1013 :83–91.
- [Bach-y Rita et al., 1969] Bach-y Rita, P., Collins, C., Saunders, F., White, B., and Scadden, L. (1969). Vision substitution by tactile image projection. *Nature*, (221) :963 – 964.
- [Bacon et al., 1998] Bacon, B. a., Villemagne, J., Bergeron, a., Lepore, F., and Guillemot, J. P. (1998). Spatial disparity coding in the superior colliculus of the cat. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 119(3) :333–44.
- [Batteau, 1967] Batteau, D. (1967). The role of the pinna in human localization. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 168(1011) :158–180.
- [Batteau, 1968] Batteau, D. (1968). Listening with the naked ear. *The Neuropsychology of Spatially Oriented Behavior*, pages 109–133.
- [Beauchamp, 2005] Beauchamp, M. S. (2005). See me, hear me, touch me : multisensory integration in lateral occipital-temporal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 15 :145–153.

- [Beauchamp et al., 2004] Beauchamp, M. S., Lee, K. E., Argall, B. D., and Martin, A. (2004). Integration of auditory and visual information about objects in superior temporal sulcus. *Neuron*, 41(5) :809–823.
- [Beckstead and Frankfurter, 1983] Beckstead, R. and Frankfurter, A. (1983). A direct projection from the retina to the intermediate gray layer of the superior colliculus. *Experimental Brain Research*, 52(2) :261–268.
- [Benedek et al., 1997] Benedek, G., Perény, J., Kovács, G., Fischer-Szátmári, L., and Katoh, Y. Y. (1997). Visual, somatosensory, auditory and nociceptive modality properties in the feline supragenulate nucleus. *Neuroscience*, 78(1) :179–89.
- [Benevento et al., 1977] Benevento, L. A., Fallon, J., Davis, B. J., and Rezak, M. (1977). Auditory-visual interaction in single cells in the cortex of the superior temporal sulcus and the orbital frontal cortex of the macaque monkey. *Experimental Neurology*, 57 :849–872.
- [Bernard et al., 2010a] Bernard, M., N’Guyen, S., Pirim, P., Gas, B., and Meyer, J.-A. (2010a). Phonotaxis behavior in the artificial rat psikharpax. In *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, IRIS2010*, Nagoya, Japan.
- [Bernard et al., 2010b] Bernard, M., N’Guyen, S., Pirim, P., Meyer, J., Guillot, A., and Gas, B. (2010b). A supramodal vibrissa tactile and auditory model for texture recognition. In Meyer, Guillot, H., editor, *The Eleventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Springer.
- [Bevan et al., 1998] Bevan, M., Booth, P., Eaton, S., and Bolam, J. (1998). Selective innervation of neostriatal interneurons by a subclass of neurons in the globus pallidus of rats. *Journal of Neuroscience*, 18(22) :9438–9452.
- [Bidet-caulet and Bertrand, 2009] Bidet-caulet, A. and Bertrand, O. (2009). Neurophysiological mechanisms involved in auditory perceptual organization. *Neuroscience*, 3(2) :182–191.
- [Binns and Salt, 1996] Binns, K. E. and Salt, T. E. (1996). Importance of NMDA receptors for multimodal integration in the deep layers of the cat superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 75(2) :920–30.
- [Bizley et al., 2007] Bizley, J. K., Nodal, F. R., Bajo, V. M., Nelken, I., and King, A. J. (2007). Physiological and anatomical evidence for multisensory interactions in auditory cortex. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 17(9) :2172–89.
- [Blake et al., 2004] Blake, R., Sobel, K. V., and James, T. W. (2004). Neural synergy between kinetic vision and touch. *Psychological science : a journal of the American Psychological Society / APS*, 15(6) :397–402.
- [Blauert, 1969] Blauert, J. (1969). Sound localization in the median plane. *Acustica*, 22(4) :205–213.
- [Blauert, 1997] Blauert, J. (1997). *Spatial hearing : The psychophysics of human sound localization*. The MIT Press.
- [Boch and Fischer, 1986] Boch, R. and Fischer, B. (1986). Further observations on the occurrence of express-saccades in the monkey. *Experimental Brain Research*, 63(3) :487–494.

- [Bodznick, 2005] Bodznick, D. (2005). Elasmobranch vision : multimodal integration in the brain. *Journal of Experimental Zoology*, 256(S5) :108–116.
- [Bogacz and Gurney, 2007] Bogacz, R. and Gurney, K. (2007). The basal ganglia and cortex implement optimal decision making between alternative actions. *Neural Computation*, 19(2) :442–447.
- [Born and Kerzel, 2008] Born, S. and Kerzel, D. (2008). Influence of target and distractor contrast on the remote distractor effect. *Vision research*, 48(28) :2805–16.
- [Braun, 1994] Braun, M. (1994). Tuned hair cells for hearing, but tuned basilar membrane for overload protection : evidence from dolphins, bats, and desert rodents. *Hearing research*, 78(1) :98–114.
- [Brecht et al., 1997] Brecht, M., Preilowski, B., and Merzenich, M. (1997). Functional architecture of the mystacial vibrissae. *Behavioural Brain Research*, 84(1-2) :81–97.
- [Bremmer et al., 2002] Bremmer, F., Klam, F., Duhamel, J.-R., Ben Hamed, S., and Graf, W. (2002). Visual-vestibular interactive responses in the macaque ventral intraparietal area (VIP). *European Journal of Neuroscience*, 16(8) :1569–1586.
- [Bronkhorst, 2000] Bronkhorst, A. W. (2000). The Cocktail Party Phenomenon : A Review of Research on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Conditions. *Acustica*, 86 :117–128.
- [Brooks, 1990] Brooks, R. (1990). Elephants don't play chess. *Robotics and Autonomous Systems*, 6(1-2) :3–15.
- [Brooks, 1989] Brooks, R. A. (1989). A robot that walks : Emergent behaviors from a carefully evolved network. Technical Report AI MEMO 1091, MIT.
- [Brown et al., 2004] Brown, J., Bullock, D., and Grossberg, S. (2004). How laminar frontal cortex and basal ganglia circuits interact to control planned and reactive saccades. *Neural Networks*, 17(4) :471–510.
- [Bruce et al., 1981] Bruce, C., Desimone, R., and Gross, C. G. (1981). Visual properties of neurons in a polysensory area in superior temporal sulcus of the macaque. *Journal of Neurophysiology*, 46 :369–384.
- [Bruno et al., 2003] Bruno, R. M., Khatiri, V., Land, P. W., and Simons, D. J. (2003). Thalamocortical angular tuning domains within individual barrels of rat somatosensory cortex. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 23(29) :9565–74.
- [Burnod, 1989] Burnod, Y. (1989). *An adaptive neural network : the cerebral cortex*. Masson.
- [Butler, 1969] Butler, R. (1969). Monaural and binaural localization of noise bursts vertically in the median sagittal plane. *Journal of Auditory Research*, 3 :230–235.
- [Caluwaerts, 2010] Caluwaerts, K. (2010). Design of a biologically inspired navigation system for the Psikharpax rodent robot. Master's thesis, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) - Universiteit Gent.

- [Calvert, 2001] Calvert, G. a. (2001). Crossmodal Processing in the Human Brain : Insights from Functional Neuroimaging Studies. *Cerebral Cortex*, 11(12) :1110–1123.
- [Calvert and Thesen, 2004] Calvert, G. a. and Thesen, T. (2004). Multisensory integration : methodological approaches and emerging principles in the human brain. *Journal of physiology, Paris*, 98(1-3) :191–205.
- [Cappe and Barone, 2005] Cappe, C. and Barone, P. (2005). Heteromodal connections supporting multisensory integration at low levels of cortical processing in the monkey. *The European journal of neuroscience*, 22(11) :2886–902.
- [Carvell and Simons, 1990] Carvell, G. and Simons, D. (1990). Biometric analyses of vibrissal tactile discrimination in the rat. *Journal of Neuroscience*, 10(8) :2638–2648.
- [Carvell and Simons, 1995] Carvell, G. and Simons, D. (1995). Task- and subject-related differences in sensorimotor behavior during active touch. *Somatosensory & Motor Research*, 12 :1–9.
- [Casseday et al., 2002] Casseday, J., Fremouw, T., and Covey, E. (2002). The inferior colliculus : a hub for the central auditory system. In *In : Fay, R.R., Popper, A.N. (Eds.), Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, pages 238–318. SpringerVerlag.
- [Chambers et al., 2005] Chambers, J., Gurney, K., Humphries, M., and Prescott, A. (2005). Mechanisms of choice in the primate brain : a quick look at positive feedback. In Bryson, J., Prescott, T., and Seth, A., editors, *Modelling Natural Action Selection : Proceedings of an International Workshop*, pages 45–52, Brighton, UK. AISB Press.
- [Chapman et al., 2000] Chapman, T., Hayes, A., and Tilden, T. (2000). Reactive maze solving with a biologically-inspired wind sensor. In J. Meyer, A. Berthoz, D. F., Roitblat, H., and Wilson, S., editors, *From Animals to Animats 6. Proceedings of the 6th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pages 81–87. MA : MIT PRESS. A Bradford Book.
- [Chaumette, 1990] Chaumette, F. (1990). *La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques*. Phd thesis, Université de Rennes 1, IRISA.
- [Chudler et al., 1995] Chudler, E. H., Sugiyama, K., and Dong, W. K. (1995). Multisensory convergence and integration in the neostriatum and globus pallidus of the rat. *Brain research*, 674(1) :33–45.
- [Cohen et al., 2008] Cohen, J. D., Hirata, A., and Castro-Alamancos, M. a. (2008). Vibrissa sensation in superior colliculus : wide-field sensitivity and state-dependent cortical feedback. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 28(44) :11205–20.
- [Collewijn, 1977] Collewijn, H. (1977). Eye- and head movements in freely moving rabbits. *Journal of Physiology*, 266 :471–498.

- [Colonius and Diederich, 2003] Colonius, H. and Diederich, A. (2003). Multisensory interaction in saccadic reaction time : a time-window-of-integration model. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(6) :1000–9.
- [Conway, 2001] Conway, B. R. (2001). Spatial structure of cone inputs to color cells in alert macaque primary visual cortex (V-1). *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 21(8) :2768–83.
- [Cooper et al., 1998] Cooper, B. G., Miya, D. Y., and Mizumori, S. J. (1998). Superior colliculus and active navigation : role of visual and non-visual cues in controlling cellular representations of space. *Hippocampus*, 8 :340–372.
- [Coren and Hoenig, 1972] Coren, S. and Hoenig, P. (1972). Effect of non-target stimuli upon length of voluntary saccades. *Perceptual and motor skills*, 34(2) :499–508.
- [Covey and Stoerig, 1991] Covey, A. and Stoerig, P. (1991). The neurobiology of blindsight. *Trends in neurosciences*, 14(4) :140–145.
- [Crawford et al., 2004] Crawford, J. D., Medendorp, W. P., and Marotta, J. J. (2004). Spatial transformations for eye-hand coordination. *Journal of neurophysiology*, 92(1) :10–9.
- [Crick and Koch, 2005] Crick, F. C. and Koch, C. (2005). What is the function of the claustrum? *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 360(1458) :1271–9.
- [Cuppini et al., 2010] Cuppini, C., Ursino, M., Magosso, E., Rowland, B. a., and Stein, B. E. (2010). An emergent model of multisensory integration in superior colliculus neurons. *Frontiers in integrative neuroscience*, 4(March) :6.
- [Dallos, 2008] Dallos, P. (2008). Cochlear amplification, outer hair cells and prestin. *Current Opinion in Neurobiology*, 18(4) :370 – 376. Sensory systems.
- [Damasio, 1994] Damasio, A. R. (1994). *Descartes' Error : Emotion, Reason, and the Human Brain*. Harper Perennial.
- [Dancer, 1992] Dancer, A. (1992). Experimental look at cochlear mechanics. *British Journal of Audiology*, 31(6) :301–312.
- [Daugman, 1980] Daugman, J. G. (1980). Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles. *Vision research*, 20(10) :847–56.
- [de Cheveigné, 1998] de Cheveigné, A. (1998). Time domain processing in the auditory system. In *5th International Conference on Neural Information Processing*, volume 3, pages 1327–1332.
- [De Monasterio and Gouras, 1975] De Monasterio, F. M. and Gouras, P. (1975). Functional properties of ganglion cells of the rhesus monkey retina. *Journal of Physiology*, 251(1) :167–195.
- [Dean et al., 1986] Dean, P., Redgrave, P., Sahibzada, N., and Tsuji, K. (1986). Head and body movements produced by electrical stimulation of superior colliculus in rats : effects of interruption of crossed tectoreticulospinal pathway. *Neuroscience*, 19(2) :367–80.

- [Denève and Pouget, 2004] Denève, S. and Pouget, A. (2004). Bayesian multisensory integration and cross-modal spatial links. *Journal of Physiology Paris*, 98(1-3) :249–258.
- [Diamond et al., 2008] Diamond, M. E., von Heimendahl, M., Itskov, P., and Arabzadeh, E. (2008). Response to : Ritt et al., "embodied information processing : vibrissa mechanics and texture features shape micromotions in actively sensing rats." *Neuron* 57, 599-613. *Neuron*, 60(5) :743–4 ; author reply 745–7.
- [Dias et al., 1991] Dias, E. C., Rocha-Miranda, C. E., Bernardes, R. F., and Schmidt, S. L. (1991). Disparity selective units in the superior colliculus of the opossum. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 87(3) :546–52.
- [Diederich et al., 2003] Diederich, A., Colonius, H., Bockhorst, D., and Tabeling, S. (2003). Visual-tactile spatial interaction in saccade generation. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 148(3) :328–37.
- [Dollé et al., 2010] Dollé, L., Sheynikhovich, D., Girard, B., Chavarriaga, R., and Guillot, A. (2010). Path planning versus cue responding : a bioinspired model of switching between navigation strategies. *Biological Cybernetics*, In Press.
- [Dominey et al., 1995] Dominey, P., Arbib, M., and Joseph, J.-P. (1995). A model of corticostriatal plasticity for learning oculomotor associations and sequences. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 7 :311–336.
- [Dominey, 1995] Dominey, P. F. (1995). Complex sensory-motor sequence learning based on recurrent state representation and reinforcement learning. *Biological Cybernetics*, 73 :265–274.
- [Dominey and Arbib, 1992] Dominey, P. F. and Arbib, M. A. (1992). A cortico-subcortical model for generation of spatially accurate sequential saccades. *Cerebral Cortex*, 2 :153–175.
- [Dreyfus, 1978] Dreyfus, H. L. (1978). *What Computers Can't Do : The Limits of Artificial Intelligence*. Harpercollins.
- [Duhamel et al., 1998] Duhamel, J. R., Colby, C. L., and Goldberg, M. E. (1998). Ventral intraparietal area of the macaque : congruent visual and somatic response properties. *Journal of Neurophysiology*, 79 :126–136.
- [Ebara et al., 2002] Ebara, S., Kumamoto, K., Matsuura, T., Mazurkiewicz, J. E., and Rice, F. L. (2002). Similarities and differences in the innervation of mystacial vibrissal follicle-sinus complexes in the rat and cat : a confocal microscopic study. *The Journal of comparative neurology*, 449(2) :103–119.
- [Enright, 1984] Enright, J. T. (1984). Changes in Vergence Mediated by Saccades. *Journal of Physiology*, 350 :9–31.
- [Ernst, 2004] Ernst, M. O. and Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the sense into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4) :162–169.

- [Ernst and Banks, 2002] Ernst, M. O. and Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870) :429–433.
- [Evinger and Fuchs, 1978] Evinger, C. and Fuchs, A. F. (1978). Saccadic, smooth pursuit, and optokinetic eye movements of the trained cat. *Journal of Physiology*, 285 :209–229.
- [Falchier et al., 2002] Falchier, A., Clavagnier, S., Barone, P., and Kennedy, H. (2002). Anatomical evidence of multimodal integration in primate striate cortex. *The Journal of Neuroscience the official journal of the Society for Neuroscience*, 22(13) :5749–5759.
- [Felleman et al., 1991] Felleman, D. J., Essen, V., and D.c (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 1 :1–47.
- [Felsen and Mainen, 2008] Felsen, G. and Mainen, Z. F. (2008). Neural substrates of sensory-guided locomotor decisions in the rat superior colliculus. *Neuron*, 60(1) :137–48.
- [Fend, 2005] Fend, M. (2005). Whisker-based texture discrimination on a mobile robot. *Advances in Artificial Life - Proceedings of the 8th European Conference on Artificial Life (ECAL)*, pages 302–312.
- [Fend et al., 2003] Fend, M., Bovet, S., Yokoi, H., and Pfeifer, R. (2003). An active artificial whisker array for texture discrimination. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume II, pages 1044–1049.
- [Ferrell, 1996] Ferrell, C. (1996). Orientation Behavior Using Registered Topographic Maps. In *the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB-96)*. *Society of Adaptive Behavior*.
- [Filliat and Meyer, 2003] Filliat, D. and Meyer, J.-a. (2003). Map-based navigation in mobile robots : I. A review of localization strategies. *Cognitive Systems Research*, 4 :243–282.
- [Findlay, 1982] Findlay, J. M. (1982). Global visual processing for saccadic eye movements. *Vision research*, 22(8) :1033–45.
- [Fischer and Breitmeyer, 1987] Fischer, B. and Breitmeyer, B. (1987). Mechanisms of visual attention revealed by saccadic eye movements. *Neuropsychologia*, 25(1A) :73–83.
- [Fix, 2007] Fix, J. (2007). A Computational Approach to the Control of Voluntary Saccadic Eye Movements. In *Advances in Cognitive Neurodynamics ICCN 2007 Proceedings of the International Conference on Cognitive Neurodynamics. ICCN 2007 Proceedings*, pages 491–494.
- [Fix et al., 2008] Fix, J., Rougier, N., and Alexandre, F. (2008). A computational approach to the covert and overt deployment of spatial attention. In *Deuxième conférence plénière française de Neurosciences Computationnelles, Neurocomp08*.

- [Flanagan, 1960] Flanagan, J. (1960). Models for approximating basilar membrane displacement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32 :937.
- [Fogassi et al., 1996] Fogassi, L., Gallese, V., Fadiga, L., Luppino, G., Matelli, M., and Rizzolatti, G. (1996). Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4). *Journal of Neurophysiology*, 76(1) :141–57.
- [Forster et al., 2002] Forster, B., Cavina-Pratesi, C., Aglioti, S. M., and Berlucchi, G. (2002). Redundant target effect and intersensory facilitation from visual-tactile interactions in simple reaction time. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 143(4) :480–7.
- [Fox et al., 2009] Fox, C. W., Mitchinson, B., Pearson, M. J., Pipe, A. G., and Prescott, T. J. (2009). Contact type dependency of texture classification in a whiskered mobile robot. *Autonomous Robots*, 26(4) :223–239.
- [Fox, 2008] Fox, K. (2008). *Barrel Cortex*. Cambridge University Press.
- [Fuxe, 2009] Fuxe, J. J. (2009). Multisensory integration : frequency tuning of audio-tactile integration. *Current biology*, 19(9) :R373–5.
- [Fuxe et al., 2000] Fuxe, J. J., Morocz, I. A., Murray, M. M., Higgins, B. A., Javitt, D. C., and Schroeder, C. E. (2000). Multisensory auditory-somatosensory interactions in early cortical processing revealed by high-density electrical mapping. *Brain research. Cognitive brain research*, 10(1-2) :77–83.
- [Fuxe and Schroeder, 2005] Fuxe, J. J. and Schroeder, C. E. (2005). The case for feedforward multisensory convergence during early cortical. *Neuroreport*, 16 :419–423.
- [Freeman and Johnson, 1982a] Freeman, A. W. and Johnson, K. O. (1982a). A model accounting for effects of vibratory amplitude on responses of cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey. *The Journal of Physiology*, 323(1) :43–64.
- [Freeman and Johnson, 1982b] Freeman, A. W. and Johnson, K. O. (1982b). Cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey : temporal discharge patterns evoked by vibration, and a receptor model. *The Journal of Physiology*, 323(1) :21–41.
- [Frens et al., 1995] Frens, M. A., van Opstal, a. J., and van Der Willigen, R. F. (1995). Spatial and temporal factors determine auditory-visual interactions in human saccadic eye movements. *Psychophysics, Perception*, 57(6) :802–816.
- [Fu et al., 2004] Fu, K.-M. G., Shah, A. S., O’Connell, M. N., McGinnis, T., Eckholdt, H., Lakatos, P., Smiley, J., and Schroeder, C. E. (2004). Timing and laminar profile of eye-position effects on auditory responses in primate auditory cortex. *Journal of Neurophysiology*, 92(6) :3522–31.
- [Fuller, 1985] Fuller, J. (1985). Eye and head movements in the pigmented rat. *Vision Research*, 25(8) :1121–1128.
- [Fuster et al., 2000] Fuster, J. M., Bodner, M., and Kroger, J. K. (2000). Cross-modal and cross-temporal association in neurons of frontal cortex. *Nature*, 405(6784) :347–51.

- [Gallagher and Holland, 1994] Gallagher, M. and Holland, P. (1994). The amygdala complex : multiple roles in associative learning and attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(25) :11771.
- [Gardner and Lisberger, 2002] Gardner, J. L. and Lisberger, S. G. (2002). Serial linkage of target selection for orienting and tracking eye movements. *Nature neuroscience*, 5(9) :892–9.
- [Ghavamzadeh and Engel, 2007] Ghavamzadeh, M. and Engel, Y. (2007). Bayesian actor-critic algorithms. *Proceedings of the 24th international conference on Machine learning - ICML '07*, pages 297–304.
- [Ghazanfar et al., 2005] Ghazanfar, A. A., Maier, J. X., Hoffman, K. L., and Logothetis, N. K. (2005). Multisensory integration of dynamic faces and voices in rhesus monkey auditory cortex. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 25(20) :5004–12.
- [Ghazanfar and Schroeder, 2006] Ghazanfar, A. A. and Schroeder, C. E. (2006). Is neocortex essentially multisensory? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(6) :278–285.
- [Ghitza, 1994] Ghitza, O. (1994). Auditory models and human performance in tasks related to speech coding and speech recognition. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2(1) :115–132.
- [Gibson and Maunsell, 1997] Gibson, J. R. and Maunsell, J. H. (1997). Sensory modality specificity of neural activity related to memory in visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 78(3) :1263–75.
- [Girard, 2003] Girard, B. (2003). *Intégration de la navigation et de la sélection de l'action dans une architecture de contrôle inspirée des ganglions de la base*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).
- [Girard and Berthoz, 2005] Girard, B. and Berthoz, A. (2005). From brainstem to cortex : Computational models of saccade generation circuitry. *Progress in Neurobiology*, 77 :215–251.
- [Girard et al., 2008] Girard, B., Tabareau, N., Pham, Q., Berthoz, A., and Slotine, J.-J. (2008). Where neuroscience and dynamic system theory meet autonomous robotics : a contracting basal ganglia model for action selection. *Neural Networks*, 21(4) :628–641.
- [Girman and Lund, 2007] Girman, S. V. and Lund, R. D. (2007). Most superficial sublamina of rat superior colliculus : neuronal response properties and correlates with perceptual figure-ground segregation. *Journal of Neurophysiology*, 98(1) :161–77.
- [Glasberg and Moore, 1990] Glasberg, B. and Moore, B. (1990). Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. *Hearing Research*, 47(1-2) :103–138.
- [Gnadt and Beyer, 1998] Gnadt, J. W. and Beyer, J. (1998). Eye movements in depth : What does the monkey's parietal cortex tell the superior colliculus? *Neuroreport*, 9(2) :233–8.

- [Gnadt and Mays, 1995] Gnadt, J. W. and Mays, L. E. (1995). Neurons in monkey parietal area LIP are tuned for eye-movement parameters in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, 73(1) :280–97.
- [Gordon, 1973] Gordon, B. (1973). Receptive fields in deep layers of cat superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 36 :157–178.
- [Gouras, 1968] Gouras, P. (1968). Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells. *Journal of Physiology*, 199(3) :533–547.
- [Graziano et al., 1999] Graziano, M. S., Reiss, L. A., and Gross, C. G. (1999). A neuronal representation of the location of nearby sounds. *Nature*, 397(6718) :428–30.
- [Graziano et al., 1994] Graziano, M. S., Yap, G. S., and Gross, C. G. (1994). Coding of visual space by premotor neurons. *Science*, 266(5187) :1054–7.
- [Graziano et al., 2002] Graziano, M. S. A., Taylor, C. S. R., and Moore, T. (2002). Complex movements evoked by microstimulation of precentral cortex. *Neuron*, 34(5) :841–51.
- [Grillner et al., 2008] Grillner, S., Wallén, P., Saitoh, K., Kozlov, A., and Robertson, B. (2008). Neural bases of goal-directed locomotion in vertebrates—an overview. *Brain research reviews*, 57(1) :2–12.
- [Gross et al., 1972] Gross, C., Rocha-Miranda, C., Bender, D., and Others (1972). Visual properties of neurons in inferotemporal cortex of the macaque. *Journal of Neurophysiology*, 35(1) :96–111.
- [Grossberg et al., 1997] Grossberg, S., Roberts, K., Aguilar, M., and Bullock, D. (1997). A neural model of multimodal adaptive saccadic eye movement control by superior colliculus. *Journal of Neuroscience*, 17(24) :9706–9725.
- [Guic-Robles et al., 1989] Guic-Robles, E., Valdivieso, C., and Guarjardo, G. (1989). Rats can learn a roughness discrimination using only their vibrissal system. *Behavioural Brain Research*, 31(3) :285–289.
- [Guillaume and Péliison, 2001] Guillaume, A. and Péliison, D. (2001). Gaze shifts evoked by electrical stimulation of the superior colliculus in the head-unrestrained cat. I. Effect of the locus and of the parameters of stimulation. *The European journal of neuroscience*, 14(8) :1331–44.
- [Guillot and Meyer, 2000] Guillot, A. and Meyer, J. (2000). From SAB94 to SAB2000 : what’s new, animat. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pages 3–12.
- [Guillot and Meyer, 2001] Guillot, A. and Meyer, J. (2001). The animat contribution to cognitive systems research. *Cognitive Systems Research*, 2(2) :157–165.
- [Guillot and Meyer, 2002] Guillot, A. and Meyer, J.-A. (2002). *Psikharpax ou l’ambition d’être un rat*, volume 350, pages 64–67.
- [Hafed and Krauzlis, 2008] Hafed, Z. M. and Krauzlis, R. J. (2008). Goal representations dominate superior colliculus activity during extrafoveal tracking. *The*

- Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 28(38) :9426–39.
- [Hagen et al., 2002] Hagen, M. C., Franzén, O., McGlone, F., Essick, G., Dancer, C., and Pardo, J. V. (2002). Tactile motion activates the human middle temporal/V5 (MT/V5) complex. *The European journal of neuroscience*, 16(5) :957–64.
- [Hannula et al., 2005] Hannula, D. E., Simons, D. J., and Cohen, N. J. (2005). Imaging implicit perception : promise and pitfalls. *Nature reviews. Neuroscience*, 6(3) :247–55.
- [Harlow, 1949] Harlow, H. F. (1949). The formation of learning sets. *Psychological review*, 56(1) :51–65.
- [Hartline et al., 1978] Hartline, P., Kass, L., and Loop, M. (1978). Merging of modalities in the optic tectum : infrared and visual integration in rattlesnakes. *Science*, 199(4334) :1225–1229.
- [Hartmann, 2001] Hartmann, M. J. (2001). Active sensing capabilities of the rat whisker system. *Autonomous Robots*, 11 :249–254.
- [Hazy et al., 2007] Hazy, T. E., Frank, M. J., and O’reilly, R. C. (2007). Towards an executive without a homunculus : computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 362(1485) :1601–13.
- [Heinzle et al., 2007] Heinzle, J., Hepp, K., and Martin, K. a. C. (2007). A microcircuit model of the frontal eye fields. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 27(35) :9341–53.
- [Hering, 1868] Hering, E. (1868). *Die lehre vom binocularen sehen*. Engelmann.
- [Hershenson, 1962] Hershenson, M. (1962). Reaction time as a measure of intersensory facilitation. *Journal of experimental psychology*, 63 :289–93.
- [Hikosaka et al., 2006] Hikosaka, O., Nakamura, K., and Nakahara, H. (2006). Basal ganglia orient eyes to reward. *Journal of Neurophysiology*, 95(2) :567–84.
- [Hikosaka et al., 1989] Hikosaka, O., Sakamoto, M., and Usui, S. (1989). Functional properties of monkey caudate neurons. I. Activities related to saccadic eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 61(4) :780–798.
- [Hipp et al., 2006] Hipp, J., Arabzadeh, E., Zorzin, E., Conradt, J., Kayser, C., Diamond, M. E., and Konig, P. (2006). Texture Signals in Whisker Vibrations. *Journal of Neurophysiology*, 95(3) :1792–1799.
- [Hoffmann, 1972] Hoffmann, K. P. (1972). The retinal input to the superior colliculus in the cat. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 11 :467–473.
- [Holmes and Spence, 2005] Holmes, N. and Spence, C. (2005). Multisensory integration : space, time and superadditivity. *Current Biology*, 15(18) :762–764.
- [Howard and Templeton, 1966] Howard, I. P. and Templeton, W. B. (1966). *Human spatial orientation*. Wiley, London, New York,.

- [Hubel and Wiesel, 1959] Hubel, D. and Wiesel, T. (1959). Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *The Journal of Physiology*, 148(3) :574.
- [Hubel and Wiesel, 1962] Hubel, D. H. and Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*, 160(1) :106–154.
- [Hubel and Wiesel, 1977] Hubel, D. H. and Wiesel, T. N. (1977). Ferrier Lecture : Functional Architecture of Macaque Monkey Visual Cortex. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 198(1130) :1–59.
- [Hughes et al., 1994] Hughes, H., Reuter-Lorenz, P., Nozawa, G., and Fendrich, R. (1994). Visual-auditory interactions in sensorimotor processing : saccades versus manual responses. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20(1) :131–153.
- [Hyvarinen and Shelepin, 1979] Hyvarinen, J. and Shelepin, Y. (1979). Distribution of visual and somatic functions in the parietal associative area 7 of the monkey. *Brain Research*, 169 :561–564.
- [Igel and Hüskel, 2000] Igel, C. and Hüskel, M. (2000). Improving the rprop learning algorithm. In *Proceedings of the Second International Symposium on Neural Computation, NC 2000*, pages 115–121.
- [Jacob et al., 2008] Jacob, V., Le Cam, J., Ego-Stengel, V., and Shulz, D. E. (2008). Emergent properties of tactile scenes selectively activate barrel cortex neurons. *Neuron*, 60(6) :1112–25.
- [James et al., 2002] James, T. W., Humphrey, G. K., Gati, J. S., Servos, P., Menon, R. S., and Goodale, M. A. (2002). Haptic study of three-dimensional objects activates extrastriate visual areas. *Neuropsychologia*, 40(10) :1706–14.
- [James, 1884a] James, W. (1884a). *Psychology, briefer course*. Harvard Univ Pr.
- [James, 1884b] James, W. (1884b). What is an Emotion? *Mind*, 9(34) :188–205.
- [Jay and Sparks, 1984] Jay, M. F. and Sparks, D. L. (1984). Auditory receptive fields in primate superior colliculus shift with changes in eye position. *Nature*, 309(5966) :345–7.
- [Jay and Sparks, 1987a] Jay, M. F. and Sparks, D. L. (1987a). Sensorimotor integration in the primate superior colliculus. I. Motor convergence. *Journal of Neurophysiology*, 57(1) :22–34.
- [Jay and Sparks, 1987b] Jay, M. F. and Sparks, D. L. (1987b). Sensorimotor integration in the primate superior colliculus. II. Coordinates of auditory signals. *Journal of Neurophysiology*, 57(1) :35–55.
- [Jeffress, 1948] Jeffress, L. (1948). A place theory of sound localization. *Journal of comparative and physiological psychology*, 41(1) :35–39.
- [Jennings and Keefer, 1969] Jennings, J. W. and Keefer, L. H. (1969). Olfactory learning set in two varieties of domestic rat. *Psychological reports*, 24(1) :3–15.

- [Jiang et al., 2002] Jiang, W., Jiang, H., and Stein, B. E. (2002). Two corticotectal areas facilitate multisensory orientation behavior. *Journal of cognitive neuroscience*, 14(8) :1240–55.
- [Jiang and Stein, 2003] Jiang, W. and Stein, B. E. (2003). Cortex controls multisensory depression in superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 90(4) :2123–35.
- [Jiang et al., 2001] Jiang, W., Wallace, M. T., Jiang, H., Vaughan, W. J., and Stein, B. E. (2001). Two Cortical Areas Mediate Multisensory Integration in Superior Colliculus Neurons. *Journal of Neurophysiology*, 85 :506–522.
- [Joel et al., 2002] Joel, D., Niv, Y., and Ruppel, E. (2002). Actor-critic models of the basal ganglia : new anatomical and computational perspectives. *Neural Networks*, 15 :pp4–6.
- [Johannesma, 1972] Johannesma, P. (1972). The pre-response stimulus ensemble of neurons in the cochlear nucleus. In *IPO Symposium on Hearing Theory. IPO, Eindhoven, The Netherlands*, pages 58–69.
- [Joris et al., 1998] Joris, P. X., Smith, P. H., and Yin, T. C. (1998). Coincidence detection in the auditory system : 50 years after Jeffress. *Neuron*, 21(6) :1235–8.
- [Joris and Yin, 1995] Joris, P. X. and Yin, C. T. (1995). Envelope Coding in the Lateral Superior Olive. I. Sensitivity to Interaural Time Differences. *Journal of Neurophysiology*, 73(3).
- [Kaiser, 1990] Kaiser, J. (1990). On a simple algorithm to calculate the ‘energy’ of a signal. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. ICASSP-90., 1990 International Conference on*, pages 381–384 vol.1.
- [Kam et al., 1997] Kam, M., Zhu, X., and Kalata, P. (1997). Sensor Fusion for Mobile Robot Navigation. *Proceedings of the IEEE*, 85(1) :108–119.
- [Khamassi, 2007] Khamassi, M. (2007). *Complementary roles of the rat prefrontal cortex and striatum in reward-based learning and shifting navigation strategies : Electrophysiological and computational studies, application to simulated autonomous robotics*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), Paris, France.
- [Khamassi et al., 2005] Khamassi, M., Lachèze, L., Girard, B., Berthoz, A., and Guillot, A. (2005). Actor-critic models of reinforcement learning in the basal ganglia : From natural to artificial rats. *Adaptive Behavior*, 13(2) :131–148.
- [Kim and Moller, 2007] Kim, D. and Moller, R. (2007). Biomimetic whiskers for shape recognition. *Robotics and Autonomous Systems*, 55 :229–243.
- [Kim et al., 1999] Kim, D.-S., Lee, S.-Y., and Kil, R. M. (1999). Auditory processing of speech signals for robust speech recognition in real-world noisy environments. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 7(1) :55–69.
- [Kim, 2004] Kim, D. and Moller, R. (2004). A biomimetic whisker for texture discrimination and distance estimation. *From Animals to Animats 8*, pages 140–149.
- [King and Palmer, 1985] King, A. and Palmer, A. (1985). Integration of visual and auditory information in bimodal neurones in the guinea-pig superior colliculus. *Experimental Brain Research*, 60(3) :492–500.

- [Kleinfeld et al., 1999] Kleinfeld, D., Berg, R. W., and O'Connor, S. M. (1999). Invited review anatomical loops and their electrical dynamics in relation to whisking by rat. *Somatosensory & Motor Research*, 16(2) :69–88.
- [Klier et al., 2001] Klier, E. M., Wang, H., and Crawford, J. D. (2001). The superior colliculus encodes gaze commands in retinal coordinates. *Nature neuroscience*, 4(6) :627–32.
- [Knill and Pouget, 2004] Knill, D. C. and Pouget, A. (2004). The Bayesian brain : the role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in neurosciences*, 27(12) :712–9.
- [Knill and Richards, 1996] Knill, D. C. and Richards, W. (1996). *Perception as Bayesian Inference*. Cambridge University Press.
- [Knudsen, 1982] Knudsen, E. (1982). Auditory and visual maps of space in the optic tectum of the owl. *Journal of Neuroscience*, 2(9) :1177–1194.
- [Koch et al., 2006] Koch, K., McLean, J., Segev, R., Freed, M. A., Berry, M. J., Balasubramanian, V., and Sterling, P. (2006). How much the eye tells the brain. *Current biology : CB*, 16(14) :1428–34.
- [Koene et al., 2007] Koene, A., Trifa, V., and Cheng, G. (2007). Gaze shift reflex in a humanoid active vision system. In *The 5th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS 2007)*, number IcvS 2007.
- [Kohonen, 1982] Kohonen, T. (1982). Self-organizing formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 43(1) :59–69.
- [Komura et al., 2005] Komura, Y., Tamura, R., Uwano, T., Nishijo, H., and Ono, T. (2005). Auditory thalamus integrates visual inputs into behavioral gains. *Nature neuroscience*, 8(9) :1203–9.
- [Krauzlis, 2004] Krauzlis, R. J. (2004). Recasting the smooth pursuit eye movement system. *Journal of Neurophysiology*, 91(2) :591–603.
- [Krauzlis, 2007] Krauzlis, R. J. (2007). Target selection, attention, and the superior colliculus. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(01) :98–99.
- [Krupa et al., 2001] Krupa, D. J., Matell, M. S., Brisben, A. J., Oliviera, L. M., and Nicolelis, M. A. L. (2001). Behavioural properties of the trigeminal somatosensory system in rats performing whisker-dependent tactile discrimination. *Journal of Neuroscience*, (21) :5752–5763.
- [Kuffler, 1953] Kuffler, S. (1953). Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. *Journal of Neurophysiology*, 16(1) :37.
- [Kujala et al., 1995] Kujala, T., Huotilainen, M., Sinkkonen, J., Ahonen, A., Alho, K., Hämäläinen, M., Ilmoniemi, R., Kajola, M., Knuutila, J., Lavikainen, J., and Others (1995). Visual cortex activation in blind humans during sound discrimination. *Neuroscience Letters*, 183(1-2) :143–146.
- [Kustov and Robinson, 1996] Kustov, A. A. and Robinson, D. L. (1996). Shared neural control of attentional shifts and eye movements. *Nature*, 384.

- [Lachèze, 2008] Lachèze, L. (2008). *Intégration d'un système visuel et de l'architecture de contrôle du rat artificiel Psikharpa*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), Paris, France.
- [Land and Fernald, 1992] Land, M. F. and Fernald, R. D. (1992). The evolution of eyes. *Annual review of neuroscience*, 15 :1–29.
- [Lange, 1885] Lange, K. (1885). Om Sindsbevægelser et psyko-fysiologisk Studie. *Kjøbenhavn. Denmark*.
- [Lavenex, 1998] Lavenex, P. (1998). Olfactory traces and spatial learning in rats. *Animal Behaviour*, 56(5) :1129–1136.
- [Lavenex and Schenk, 1996] Lavenex, P. and Schenk, F. (1996). Integration of olfactory information in a spatial representation enabling accurate arm choice in the radial arm maze. *Learning & memory (Cold Spring Harbor, N. Y.)*, 2(6) :299–319.
- [Lederman, 1979] Lederman, S. J. (1979). Auditory texture perception. *Perception*, 8 :93–103.
- [LeDoux, 2000] LeDoux, J. (2000). Emotion circuits in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, pages 155–184.
- [Leinonen et al., 1980] Leinonen, L., Hyvärinen, J., and Sovijärvi, A. R. (1980). Functional properties of neurons in the temporo-parietal association cortex of awake monkey. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 39(2) :203–15.
- [Lévy-Schoen, 1969] Lévy-Schoen, A. (1969). Détermination et latence de la réponse oculomotrice à deux stimulus simultanés ou successifs selon leur excentricité relative. *L'année psychologique*, 69(2) :373–392.
- [Lichtenstein et al., 1990] Lichtenstein, S. H., Carvell, G. E., and Simons, D. J. (1990). Responses of rat trigeminal ganglion neurons to movements of vibrissae in different directions. *Somatosensory & Motor Research*, 7 :47 – 65.
- [Licklider and Pollack, 1948] Licklider, J. C. R. and Pollack, I. (1948). Effect of differentiation, integration, and infinite peak clipping upon the intelligibility of speech. *Journal of the acoustical society of america*, 20(1) :42–52.
- [Linden and Perry, 1983] Linden, R. and Perry, V. H. (1983). Massive retinotectal projection in rats. *Brain research*, 272(1) :145–9.
- [Liu et al., 2008] Liu, J., Erwin, H., and Wermter, S. (2008). Mobile robot broadband sound localisation using a biologically inspired spiking neural network. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2191–2196.
- [Lottm and Azouz, 2009] Lottm, E. and Azouz, R. (2009). Mechanisms of tactile information transmission through whisker vibrations. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 29(37) :11686–97.
- [Lünenburger et al., 2001] Lünenburger, L., Kleiser, R., Stuphorn, V., Miller, L. E., and Hoffmann, K.-P. (2001). *Vision : From Neurons to Cognition*, volume 134 of *Progress in Brain Research*. Elsevier.

- [Lungarella et al., 2002] Lungarella, M., Hafner, V., Pfeifer, R., and Yokoi, H. (2002). Artificial whisker sensors in robotics. *Intelligent Robots and System, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, 3 :2931–2936.
- [Ma and Pouget, 2008] Ma, W. J. and Pouget, A. (2008). Linking neurons to behavior in multisensory perception : A computational review. *Brain Research*, 1242 :4–12.
- [Macaluso, 2000] Macaluso, E. (2000). Modulation of Human Visual Cortex by Crossmodal Spatial Attention. *Science*, 289(5482) :1206–1208.
- [Macaluso and Driver, 2005] Macaluso, E. and Driver, J. (2005). Multisensory spatial interactions : a window onto functional integration in the human brain. *Trends in neurosciences*, 28(5) :264–71.
- [Magosso et al., 2008] Magosso, E., Cuppini, C., Serino, A., Di Pellegrino, G., and Ursino, M. (2008). A theoretical study of multisensory integration in the superior colliculus by a neural network model. *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, 21(6) :817–29.
- [Maier et al., 2004] Maier, J. X., Neuhoff, J. G., Logothetis, N. K., and Ghazanfar, A. A. (2004). Multisensory integration of looming signals by rhesus monkeys. *Neuron*, 43(2) :177–81.
- [Manley and Köppl, 1998] Manley, G. a. and Köppl, C. (1998). Phylogenetic development of the cochlea and its innervation. *Current opinion in neurobiology*, 8(4) :468–74.
- [Martin et al., 2009] Martin, J. G., Meredith, M. A., and Ahmad, K. (2009). Modeling multisensory enhancement with self-organizing maps. *Frontiers in computational neuroscience*, 3(June) :8.
- [Martinet et al., 2008] Martinet, L., Fouque, B., Passot, J., Meyer, J., and A (2008). Modelling the cortical columnar organisation for topological state-space representation, and action planning. In Asada, M., Hallam, J. C. T., Meyera, J.-A., and Tani, J., editors, *From Animals to Animats 10. Proceedings of the 10th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pages 137–147.
- [Matsumoto et al., 2001] Matsumoto, N., Minamimoto, T., Graybiel, A. M., and Kimura, M. (2001). Neurons in the thalamic CM-Pf complex supply striatal neurons with information about behaviorally significant sensory events. *Journal of Neurophysiology*, 85(2) :960–76.
- [May et al., 1990] May, P. J., Hartwich-Young, R., Nelson, J., Sparks, D. L., and Porter, J. D. (1990). Cerebellotectal pathways in the macaque : implications for collicular generation of saccades. *Neuroscience*, (2) :305–324.
- [May et al., 2010] May, P. J., McHaffie, J. G., Stanford, T. R., Jiang, H., Costello, M. G., Coizet, V., Hayes, L. M., Haber, S. N., and Redgrave, P. (2010). Tectonigral Projections in the Primate : A Pathway for Pre-Attentive Sensory Input to Midbrain Dopaminergic Neurons. *European Journal of Neuroscience*, 29(3) :575–587.

- [McAlpine, 2005] McAlpine, D. (2005). Creating a sense of auditory space. *The Journal of physiology*, 566(Pt 1) :21–8.
- [McAlpine and Grothe, 2003] McAlpine, D. and Grothe, B. (2003). Sound localization and delay lines – do mammals fit the model? *Trends in Neurosciences*, 26(7) :347–350.
- [Mccarthy et al., 1956] Mccarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., Shannon, C. E., and Laboratories, B. T. (1956). A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence.
- [McGurk and MacDonald, 1976] McGurk, H. and MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(23/30) :746–748.
- [McHaffie et al., 2005] McHaffie, J., Stanford, T., Stein, B., Coizet, V., and Redgrave, P. (2005). Subcortical loops through the basal ganglia. *Trends in Neuroscience*, 28(8) :401–407.
- [McNaughton et al., 1996] McNaughton, B. L., Barnes, C. a., Gerrard, J. L., Gothard, K., Jung, M. W., Knierim, J. J., Kudrimoti, H., Qin, Y., Skaggs, W. E., Suster, M., and Weaver, K. L. (1996). Deciphering the hippocampal polyglot : the hippocampus as a path integration system. *The Journal of experimental biology*, 199(Pt 1) :173–85.
- [Meddis and O'Mard, 2005] Meddis, R. and O'Mard, L. P. (2005). A computer model of the auditory-nerve response to forward-masking stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(6) :3787.
- [Meredith et al., 1987] Meredith, M., Nemitz, J., and Stein, B. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. Temporal factors. *Journal of Neuroscience*, 7(10) :3215.
- [Meredith and Stein, 1983] Meredith, M. and Stein, B. (1983). Interactions among converging sensory inputs in the superior colliculus. *Science*, 221(4608) :389–391.
- [Meredith and Stein, 1986] Meredith, M. A. and Stein, B. E. (1986). Visual, auditory, and somatosensory convergence on cells in superior colliculus results in multisensory integration. *Journal of Neurophysiology*, 56(3) :640–662.
- [Meyer and Guillot, 1991] Meyer, J. and Guillot, A. (1991). Simulation of adaptive behavior in animats : Review and prospect. In *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animats*, pages 2–14. MIT Press.
- [Meyer, 1995] Meyer, J.-A. (1995). *The Animat Approach to Cognitive Science*, pages 27–44. The MIT Press.
- [Meyer, 1996a] Meyer, J.-A. (1996a). *Artificial Life and the Animat Approach to Artificial Intelligence*, pages 325–354. Academic Press.
- [Meyer, 1996b] Meyer, J.-A. (1996b). Pour une approche complémentaire de l'ia traditionnelle : le manifeste animat. *In Cognito*, 6 :1–4.
- [Meyer, 2002] Meyer, J.-A. (2002). Psikharpax. vers la synthèse d'un rat artificiel. In Ghallab, editor, *Actes des Journées du Programme Interdisciplinaire ROBEA*, pages 29–32. LAAS.

- [Meyer and Filliat, 2003] Meyer, J.-a. and Filliat, D. (2003). Map-based navigation in mobile robots : II. A review of map-learning and path-planning strategies. *Cognitive Systems Research*, 4 :283–317.
- [Meyer and Guillot, 1994] Meyer, J.-A. and Guillot, A. (1994). From SAB90 to SAB94 : four years of animat research. In *SAB94 : Proceedings of the third international conference on Simulation of adaptive behavior : from animals to animats 3*, pages 2–11, Cambridge, MA, USA. MIT Press.
- [Meyer et al., 2005] Meyer, J.-A., Guillot, A., Girard, B., Khamassi, M., Pirim, P., and Berthoz, A. (2005). The psikharpax project : Towards building an artificial rat. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4) :211–223.
- [Milani et al., 1989] Milani, H., Steiner, H., and Huston, J. P. (1989). Analysis of recovery from behavioral asymmetries induced by unilateral removal of vibrissae in the rat. *Behavioral Neuroscience*, 103(5) :1067 – 1074.
- [Mink, 1996] Mink, J. W. (1996). The basal ganglia : focused selection and inhibition of competing motor programs. *Progress in Neurobiology*, 50(4) :381–425.
- [Mitchell and Zipser, 2001] Mitchell, J. and Zipser, D. (2001). A model of visual-spatial memory across saccades. *Vision Res*, 41(12) :1575–1592.
- [Mitchell and Zipser, 2003] Mitchell, J. and Zipser, D. (2003). Sequential memory-guided saccades and target selection : a neural model of the frontal eye fields. *Vision Research*, 43 :2669–2695.
- [Mitchinson et al., 2004] Mitchinson, B., N. Gurney, K., Redgrave, P., Melhuish, C., G. Pipe, A., Pearson, M., Gilhespy, I., and J. Prescott, T. (2004). Empirically inspired simulated electro-mechanical model of the rat mystacial follicle-sinus complex. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 271(1556) :2509–2516.
- [Mitchinson et al., 2006] Mitchinson, B., Pearson, M., Melhuish, C., and Prescott, T. J. (2006). A Model of Sensorimotor Coordination in the Rat Whisker System. In *From Animals to Animats 9 : Proceedings of the Ninth International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour, (Lecture Notes in Artificial Intelligence, 4095)*., pages 77–88. Springer-Verlag.
- [Montague et al., 1996] Montague, P. R., Dayan, P., and Sejnowski, T. J. (1996). A framework for mesencephalic dopamine systems based on predictive hebbian learning. *Journal of Neuroscience*, 16(5) :1936–1947.
- [Moore, 1974] Moore, B. (1974). Relation between the critical bandwidth and the frequency-difference limen. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 55 :359.
- [Moore and Andermann, 2005] Moore, C. I. and Andermann, M. L. (2005). The vibrissa resonance hypothesis. chapter 2, pages 21–60. CRC Press.
- [Moravec, 1990] Moravec, H. (1990). *Mind Children : The Future of Robot and Human Intelligence*. Harvard University Press.

- [Morley et al., 1983] Morley, J. W., Goodwin, A. W., and Darian-Smith, I. (1983). Tactile discrimination of gratings. *Experimental Brain Research*, 49 :291 – 199.
- [Morrel, 1972] Morrel, F. (1972). Visual System’s View of Acoustic Space. *Nature*, 238(5358) :44–46.
- [Mountcastle, 1978] Mountcastle, V. (1978). An organizing principle for cerebral function : the unit model and the distributed system. In Edelman, G. and Mountcastle, V., editors, *The Mindful Brain*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- [Mountcastle, 1997] Mountcastle, V. (1997). The columnar organization of the neocortex. *Brain*, 120(4) :701–722.
- [Munoz and Wurtz, 1995] Munoz, D. P. and Wurtz, R. H. (1995). Saccade-related activity in monkey superior colliculus. I. Characteristics of burst and buildup cells. *Journal of Neurophysiology*, 73(6) :2313–2333.
- [Nagy et al., 2006] Nagy, A., Eördegh, G., Paróczy, Z., Márkus, Z., and Benedek, G. (2006). Multisensory integration in the basal ganglia. *The European journal of neuroscience*, 24(3) :917–24.
- [Neimark et al., 2003] Neimark, M. A., Andermann, M. L., Hopfield, J. J., and Moore, C. I. (2003). Vibrissa resonance as a transduction mechanism for tactile encoding. *The Journal of Neuroscience*, 23(16) :6499–6509.
- [Newell, 1980] Newell, A. (1980). Physical symbol systems. *Cognitive Science*, 4(2) :135–183.
- [N’Guyen et al., 2009] N’Guyen, S., Pirim, P., and Meyer, J.-A. (2009). Elastomer-based tactile sensor array for the artificial rat psikharpax. In *ISEF 2009 - XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*.
- [N’Guyen et al., 2010a] N’Guyen, S., Pirim, P., and Meyer, J.-A. (2010a). Tactile texture discrimination in the robot-rat psikharpax. In *BIOSIGNALS 2010, Third International Conference on Bio-Inspired Systems and Signal Processing*, Valencia, Spain.
- [N’Guyen et al., 2010b] N’Guyen, S., Pirim, P., Meyer, J.-A., and Girard, B. (2010b). An integrated neuromimetic model of the saccadic eye movements for the psikharpax robot. In *From Animals to Animats 11 : Proceedings of the Eleventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*.
- [Nishijo et al., 1988] Nishijo, H., Ono, T., and Nishino, H. (1988). Topographic distribution of modality-specific amygdalar neurons in alert monkey. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 8(10) :3556–69.
- [Nissen, 2003] Nissen, S. (2003). Implementation of a Fast Artificial Neural Network Library (fann). *Report, Department of Computer Science University of Copenhagen (DIKU)*, 31.
- [Nordmark, 1968] Nordmark, J. (1968). Mechanisms of frequency discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44 :1533.

- [Nozawa et al., 1994] Nozawa, G., Reuter-Lorenz, P. A., and Hughes, H. C. (1994). Parallel and serial processes in the human oculomotor system : bimodal integration and express saccades. *Biological Cybernetics*, 72 :19–34.
- [Ohlander et al., 1978] Ohlander, R., Price, K., and Reddy, D. (1978). Picture segmentation using a recursive region splitting method. *Computer Graphics and Image Processing*, 8(3) :313–333.
- [O’Keefe and Nadel, 1978] O’Keefe, J. and Nadel, L. (1978). *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford University Press.
- [Olson and Graybiel, 1980] Olson, C. R. and Graybiel, A. M. (1980). Sensory maps in the claustrum of the cat. *Nature*, 288(5790) :479–81.
- [Panksepp, 1998] Panksepp, J. (1998). The periconscious substrates of consciousness : Affective states and the evolutionary origins of the SELF. *Journal of Consciousness Studies*, 5, 5(6) :566–582.
- [Parent et al., 2000] Parent, A., Sato, F., Wu, Y., Gauthier, J., Lévesque, M., and Parent, M. (2000). Organization of the basal ganglia : the importance of the axonal collateralization. *Trends in Neuroscience*, 23(10) :S20–S27.
- [Patton and Anastasio, 2003] Patton, P. E. and Anastasio, T. J. (2003). Modeling cross-modal enhancement and modality-specific suppression in multisensory neurons. *Neural computation*, 15(4) :783–810.
- [Pearce et al., 2003] Pearce, T., Schiffman, S., Nagle, H., and Gardner, J. (2003). Handbook of machine olfaction : electronic nose technology. *Sensors Update*.
- [Pekkola et al., 2005] Pekkola, J., Ojanen, V., Autti, T., Jääskeläinen, I. P., Möttönen, R., Tarkiainen, A., and Sams, M. (2005). Primary auditory cortex activation by visual speech : an fMRI study at 3 T. *Neuroreport*, 16(2) :125–8.
- [Pélisson et al., 2001] Pélisson, D., Goffart, L., Guillaume, A., Catz, N., and Raboyeau, G. (2001). Early head movements elicited by visual stimuli or collicular electrical stimulation in the cat. *Vision research*, 41(25-26) :3283–94.
- [Petersen, 2007] Petersen, C. C. (2007). The functional organization of the barrel cortex. *Neuron*, 56(2) :339 – 355.
- [Pierrot-deseilligny et al., 2004] Pierrot-deseilligny, C., Milea, D., and Müri, R. (2004). Eye movement control by the cerebral cortex. *Current Opinion in Neurology*, pages 17–25.
- [Pierrot-Deseilligny et al., 1995] Pierrot-Deseilligny, C., Rivaud, S., Gaymard, B., Müri, R., and Vermersch, A. (1995). Cortical control of saccades. *Annals of Neurology*, 37 :557–567.
- [Pietrini et al., 2004] Pietrini, P., Furey, M. L., Ricciardi, E., Gobbi, M. I., Wu, W.-H. C., Cohen, L., Guazzelli, M., and Haxby, J. V. (2004). Beyond sensory images : Object-based representation in the human ventral pathway. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(15) :5658–63.

- [Pirim and Sikora, 2009] Pirim, P. and Sikora, S. (2009). Conversation with : Steve N’Guyen. Personal communication.
- [Poremba et al., 2003] Poremba, A., Saunders, R. C., Crane, A. M., Cook, M., Sokoloff, L., and Mishkin, M. (2003). Functional mapping of the primate auditory system. *Science*, 299(5606) :568–72.
- [Posner, 1980] Posner, M. (1980). Orienting of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1) :3–25.
- [Pouget et al., 2002] Pouget, A., Deneve, S., and Duhamel, J. R. (2002). A computational perspective on the neural basis of multisensory spatial representations. *Nature Neuroscience*, 3 :741–747.
- [Pouget and Sejnowski, 1995] Pouget, A. and Sejnowski, T. J. (1995). *Dynamic Remapping*, volume 37, pages 335–338. MA :MIT Press, Cambridge.
- [Prescott et al., 2009] Prescott, T., Pearson, M., Mitchinson, B., Sullivan, J., and Pipe, A. (2009). Whisking with robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 16(3) :42–50.
- [Pribram et al., 1954] Pribram, K. H., Rosner, B. S., and Rosenblith, W. A. (1954). Electrical responses to acoustic clicks in monkey : extent of neocortex activated. *Journal of Neurophysiology*, 17(4) :336–44.
- [Priebe et al., 2006] Priebe, N. J., Lisberger, S. G., and Movshon, J. A. (2006). Tuning for spatiotemporal frequency and speed in directionally selective neurons of macaque striate cortex. *The Journal of neuroscience the official journal of the Society for Neuroscience*, 26(11) :2941–2950.
- [Prinz, 2004] Prinz, J. J. (2004). *Gut Reactions : A Perceptual Theory of Emotion (Philosophy of Mind)*. Oxford University Press, USA.
- [Ramon Y Cajal, 1900] Ramon Y Cajal, S. (1900). *Structure of the Mammalian Retina*. Madrid.
- [Ravulakollu et al., 2009] Ravulakollu, K., Knowles, M., Liu, J., Wermter, S., and Way, S. P. (2009). *Towards Computational Modelling of Neural Multimodal Integration Based on the Superior Colliculus Concept*, pages 269–291. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Rayleigh, 1907] Rayleigh, L. (1907). On our perception of sound direction. *Philosophical Magazine*, 13(74) :214–232.
- [Redgrave, 2007] Redgrave, P. (2007). Basal ganglia. *Scholarpedia*, 2(6) :1825.
- [Redgrave et al., 1999] Redgrave, P., Prescott, T. J., and Gurney, K. (1999). The basal ganglia : a vertebrate solution to the selection problem? *Neuroscience*, 89(4) :1009–1023.
- [Redish, 1999] Redish, A. D. (1999). *Beyond the Cognitive Map : From Place Cells to Episodic Memory*. The MIT Press.
- [Rice et al., 1993] Rice, F. L., Kinnman, E., Aldskogius, H., Johansson, O., and Arvidsson, J. (1993). The innervation of the mystacial pad of the rat as revealed by

- pgp 9.5 immunofluorescence. *The Journal of Comparative Neurology*, 337(3) :366–385.
- [Ritt and Moore, 2008] Ritt, J. and Moore, C. (2008). Response to Letter : Ritt et al., "Embodied Information Processing : Vibrissa Mechanics and Texture Features Shape Micromotions in Actively Sensing Rats." *Neuron* 57, 599-613. *Neuron*, 60(5) :745–747.
- [Ritt et al., 2008] Ritt, J. T., Andermann, M. L., and Moore, C. I. (2008). Embodied information processing : Vibrissa mechanics and texture features shape micromotions in actively sensing rats. *Neuron*, 57(4) :599–613.
- [Rizzolatti et al., 1981] Rizzolatti, G., Scandolara, C., Gentilucci, M., and Camarda, R. (1981). Response properties and behavioral modulation of "mouth" neurons of the postarcuate cortex (area 6) in macaque monkeys. *Brain Research*, 225 :421–424.
- [Robinson, 1972] Robinson, D. (1972). Eye movements evoked by collicular stimulation in the alert monkey. *Vision Research*, 12 :1795–1808.
- [Rockland and Ojima, 2003] Rockland, K. S. and Ojima, H. (2003). Multisensory convergence in calcarine visual areas in macaque monkey. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 50(1-2) :19–26.
- [Romanski et al., 1993] Romanski, L. M., Clugnet, M. C., Bordi, F., and LeDoux, J. E. (1993). Somatosensory and auditory convergence in the lateral nucleus of the amygdala. *Behavioral neuroscience*, 107(3) :444–50.
- [Rowland et al., 2007] Rowland, B. A., Stanford, T. R., and Stein, B. E. (2007). A model of the neural mechanisms underlying multisensory integration in the superior colliculus. *Perception*, 36(10) :1431–43.
- [Rucci et al., 1999] Rucci, M., Edelman, G., and Wray, J. (1999). Adaptation of orienting behavior : from the barn owl to a robotic system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(1) :96–110.
- [Russell, 1985] Russell, R. A. (1985). Object recognition using articulated whisker probes. In *Proc. 15th Int. Symp. Industr. Robots.*, pages 605–612.
- [Russell, 1992] Russell, R. A. (1992). Using tactile whiskers to measure surface contours. In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1295–1299.
- [Sadato et al., 1996] Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J., Ibanez, V., and MP (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature*, (380) :526 – 528.
- [Samson et al., 1991] Samson, C., Borgne, M. L., and Espiau, B. (1991). *Robot Control : The Task Function Approach*. Oxford University Press, USA.
- [Sathian, 2002] Sathian, K. (2002). Feeling with the mind's eye : contribution of visual cortex to tactile perception. *Behavioural Brain Research*, 135(1-2) :127–132.

- [Schiff et al., 1962] Schiff, W., Caviness, J. A., and Gibson, J. J. (1962). Persistent fear responses in rhesus monkeys to the optical stimulus of "looming". *Science*, 136 :982–3.
- [Schiller, 1972] Schiller, P. H. (1972). The role of the monkey superior colliculus in eye movement and vision. *Investigative ophthalmology*, 11(6) :451–60.
- [Schlack et al., 2005] Schlack, A., Sterbing-D'Angelo, S. J., Hartung, K., Hoffmann, K.-P., and Bremmer, F. (2005). Multisensory space representations in the macaque ventral intraparietal area. *The Journal of Neuroscience the official journal of the Society for Neuroscience*, 25(18) :4616–4625.
- [Schnupp and Carr, 2009] Schnupp, J. W. H. and Carr, C. E. (2009). On hearing with more than one ear : lessons from evolution. *Nature neuroscience*, 12(6) :692–697.
- [Schroeder and Foxe, 2005] Schroeder, C. E. and Foxe, J. (2005). Multisensory contributions to low-level, 'unisensory' processing. *Current opinion in neurobiology*, 15(4) :454–8.
- [Schroeder and Foxe, 2002] Schroeder, C. E. and Foxe, J. J. (2002). The timing and laminar profile of converging inputs to multisensory areas of the macaque neocortex. *Brain research. Cognitive brain research*, 14(1) :187–98.
- [Schroeder et al., 2001] Schroeder, C. E., Lindsley, R. W., Specht, C., Marcovici, A., Smiley, J. F., and Javitt, D. C. (2001). Somatosensory input to auditory association cortex in the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 85(3) :1322–7.
- [Schultz et al., 1997] Schultz, W., Dayan, P., and Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, 275 :1593–1599.
- [Scudder et al., 2002] Scudder, C., Kaneko, C., and Fuchs, A. (2002). The brainstem burst generator for saccadic eye movements. A modern synthesis. *Experimental Brain Research*, 142 :439–462.
- [Seth et al., 2004] Seth, A. K., McKinsty, J. L., Edelman, G. M., and Krichmar, J. L. (2004). Spatiotemporal processing of whisker input supports texture discrimination by a brain-based device. In Schall, S., Ijspeert, A., Billard, A., Vijayakumar, S., Hallam, J., and Meyer, J., editors, *From Animals to Animats 8. Proc. of the 8th Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*. MA : MIT PRESS.
- [Shams et al., 2000] Shams, L., Kamitani, Y., and Shimojo, S. (2000). What you see is what you hear. *Nature*, 408(14) :788.
- [Sherk, 1986] Sherk, H. (1986). The claustrum and the cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 5 :467–499.
- [Sheynikhovich et al., 2009] Sheynikhovich, D., Chavarriaga, R., Strösslin, T., Arleo, A., and Gerstner, W. (2009). Is there a geometric module for spatial orientation? Insights from a rodent navigation model. *Psychological review*, 116(3) :540–66.
- [Shoykhet et al., 2000] Shoykhet, M., Doherty, D., and Simons, D. J. (2000). Coding of deflection velocity and amplitude by whisker primary afferent neurons : implications for higher level processing. *Somatosensory & Motor Research*, 17.

- [Siminoff et al., 1966] Siminoff, R., Schwassmann, H., and Kruger, L. (1966). An electrophysiological study of the visual projection to the superior colliculus of the rat. *Journal of Comparative Neurology*, 127 :435–444.
- [Slaney, 1993] Slaney, M. (1993). An efficient implementation of the Patterson-Holdsworth auditory filter bank. *Apple Computer, Perception Group, Tech. Rep.*
- [Slavík and Bell, 1995] Slavík, P. and Bell, J. (1995). A mechanoreceptor model for rapidly and slowly adapting afferents subjected to periodic vibratory stimuli. *Mathematical Biosciences*, 130(1) :1 – 23.
- [Slotnick, 2001] Slotnick, B. (2001). Animal cognition and the rat olfactory system. *Trends in cognitive sciences*, 5(5) :216–222.
- [Smith et al., 1998] Smith, Y., Bevan, M. D., Shink, E., and Bolam, J. P. (1998). Microcircuitry of the direct and indirect pathways of the basal ganglia. *Neuroscience*, 86 :353–387.
- [Solomon and Hartmann, 2006] Solomon, J. H. and Hartmann, M. J. (2006). Bio-mechanics : robotic whiskers used to sense features. *Nature*, 443(7111) :525.
- [Sprague, 1966] Sprague, J. M. (1966). Interaction of cortex and superior colliculus in mediation of visually guided behavior in the cat. *Science*, 153(743) :1544–7.
- [Sprague and Meikle, 1965] Sprague, J. M. and Meikle, T. H. (1965). The Role of the Superior Colliculus in Visually Guided Behavior. *Experimental neurology*, 11 :115–46.
- [Sreenivas and Niederjohn, 1992] Sreenivas, T. V. and Niederjohn, R. J. (1992). Spectral analysis for formant frequency estimation in noise. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40(2) :282–293.
- [Sridharan et al., 2006] Sridharan, D., Prashanth, P. S., and Chakravarthy, V. S. (2006). The role of the basal ganglia in exploration in a neural model based on reinforcement learning. *International Journal of Neural Systems*, 16 :111–124.
- [Stein et al., 1975] Stein, B., Magalhaes-Castro, B., and Kruger, L. (1975). Superior colliculus : visuotopic-somatotopic overlap. *Science*, 189(4198) :224–226.
- [Stein et al., 2002] Stein, B., Wallace, M., Stanford, T., and Jiang, W. (2002). Cortex governs multisensory integration in the midbrain. *Neuroscientist*, 84 :306–314.
- [Stein et al., 1988] Stein, B. E., Huneycutt, W. S., and Meredith, M. a. (1988). Neurons and behavior : the same rules of multisensory integration apply. *Brain research*, 448(2) :355–8.
- [Stein and Meredith, 1993] Stein, B. E. and Meredith, M. A. (1993). *The Merging of the Senses*. MIT Press.
- [Stein et al., 1989] Stein, B. E., Meredith, M. A., Huneycutt, W. S., and McDade, L. (1989). Behavioral indices of multisensory integration : Orientation to visual cues is affected by auditory stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1(1) :12–24.

- [Stryker and Schiller, 1975] Stryker, M. P. and Schiller, P. H. (1975). Eye and head movements evoked by electrical stimulation of monkey superior colliculus. *Experimental brain research*, 23(1) :103–12.
- [Stuphorn et al., 2000] Stuphorn, V., Bauswein, E., and Hoffman, K. (2000). Neurons in the primate superior colliculus coding for arm movements in gaze-related coordinates. *Journal of Neurophysiology*, pages 1283–1299.
- [Sutton, 1988] Sutton, R. (1988). Learning to predict by the methods of temporal differences. *Machine learning*, 3(1) :9–44.
- [Sutton and Barto, 1998] Sutton, R. S. and Barto, A. G. (1998). *Reinforcement Learning : An Introduction*. The MIT Press, Cambridge, MA.
- [Szentagothai, 1975] Szentagothai, J. (1975). The 'module-concept' in cerebral cortex architecture. *Brain Research*, 95 :475–496.
- [Tabareau et al., 2007] Tabareau, N., Bennequin, D., Berthoz, A., Slotine, J.-J., and Girard, B. (2007). Geometry of the superior colliculus mapping and efficient oculomotor computation. *Biological Cybernetics*, 97(4) :279–292.
- [Talavage et al., 2004] Talavage, T. M., Sereno, M. I., Melcher, J. R., Ledden, P. J., Rosen, B. R., and Dale, A. M. (2004). Tonotopic Organization in Human Auditory Cortex Revealed by Progressions of Frequency Sensitivity. *Journal of Neurophysiology*, 91(3) :1282–1296.
- [Touretzky and Redish, 1996] Touretzky, D. S. and Redish, a. D. (1996). Theory of rodent navigation based on interacting representations of space. *Hippocampus*, 6(3) :247–70.
- [Towal and Hartmann, 2006] Towal, R. B. and Hartmann, M. J. (2006). Right-left asymmetries in the whisking behavior of rats anticipate head movements. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 26(34) :8838–46.
- [Trappl et al., 2003] Trappl, R., Petta, P., and Payr, S. (2003). *Emotions in Humans and Artifacts*. The MIT Press.
- [Trullier et al., 1997] Trullier, O., Wiener, S. I., Berthoz, a., and Meyer, J. a. (1997). Biologically based artificial navigation systems : review and prospects. *Progress in neurobiology*, 51(5) :483–544.
- [Turing, 1950] Turing, A. M. (1950). Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, 59(236) :433–460.
- [Ursino et al., 2009] Ursino, M., Cuppini, C., Magosso, E., Serino, A., and di Pellegrino, G. (2009). Multisensory integration in the superior colliculus : a neural network model. *Journal of computational neuroscience*, 26(1) :55–73.
- [van Atteveldt et al., 2004] van Atteveldt, N., Formisano, E., Goebel, R., and Blomert, L. (2004). Integration of letters and speech sounds in the human brain. *Neuron*, 43(2) :271–282.
- [van Beers et al., 1996] van Beers, R. J., Sittig, A. C., and Denier van der Gon, J. J. (1996). How humans combine simultaneous proprioceptive and visual position information. *Experimental brain research*, 111(2) :253–61.

- [van Beers et al., 1998] van Beers, R. J., Sittig, A. C., and Denier van der Gon, J. J. (1998). The precision of proprioceptive position sense. *Experimental brain research*, 122(4) :367–77.
- [van Beers et al., 1999] van Beers, R. J., Sittig, a. C., and Gon, J. J. (1999). Integration of proprioceptive and visual position-information : An experimentally supported model. *Journal of Neurophysiology*, 81(3) :1355–64.
- [van Beers et al., 2002] van Beers, R. J., Wolpert, D. M., and Haggard, P. (2002). When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation. *Current biology : CB*, 12(10) :834–7.
- [van der Loos and Woolsey, 1973] van der Loos, H. and Woolsey, T. A. (1973). Somatosensory cortex : structural alterations following early injury to sense organs. *Science*, 179(71) :395–8.
- [van Opstal and van Gisbergen, 1990] van Opstal, A. J. and van Gisbergen, J. A. (1990). Role of monkey superior colliculus in saccade averaging. *Experimental brain research*, 79(1) :143–9.
- [Vaney et al., 1981] Vaney, D. I., Peichl, L., Wässle, H., and Illing, R. B. (1981). Almost all ganglion cells in the rabbit retina project to the superior colliculus. *Brain research*, 212(2) :447–53.
- [Varela et al., 1999] Varela, F. J., Thompson, E., and Rosch, E. (1999). *L'inscription corporelle de l'esprit*. Seuil.
- [Vincent, 1912] Vincent, S. B. (1912). *The function of the vibrissae in the behavior of the white rat*. Behavior monographs.
- [von Békésy and Wever, 1960] von Békésy, G. and Wever, E. (1960). *Experiments in hearing*. McGraw-Hill New York.
- [von Helmholtz, 1867] von Helmholtz, H. (1867). *Handbuch der physiologischen Optik*. Voss.
- [von Helmholtz and Brning, 1863] von Helmholtz, H. and Brning, J. (1863). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sons.
- [von Kriegstein et al., 2005] von Kriegstein, K., Kleinschmidt, A., Sterzer, P., and Giraud, A.-L. (2005). Interaction of face and voice areas during speaker recognition. *Journal of cognitive neuroscience*, 17(3) :367–76.
- [Wallace et al., 1993] Wallace, M. T., Meredith, M. A., and Stein, B. E. (1993). Converging influences from visual, auditory, and somatosensory cortices onto output neurons of the superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 69(6) :1797–1809.
- [Wallace and Stein, 1994] Wallace, M. T. and Stein, B. E. (1994). Cross-modal synthesis in the midbrain depends on input from cortex. *Journal of Neurophysiology*, 71(1) :429–32.
- [Wallace et al., 1996] Wallace, M. T., Wilkinson, L. K., and Stein, B. E. (1996). Representation and integration of multiple sensory inputs in primate superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 76(2) :1246–66.

- [Walter, 1950] Walter, G. W. (1950). An Imitation of Life. *Scientific American*, pages 42–45.
- [Warren, 2008] Warren, R. M. (2008). *Auditory Perception : an analysis and synthesis*. Cambridge University Press, third edition.
- [Wässle and Illing, 1980] Wässle, H. and Illing, R. B. (1980). The retinal projection to the superior colliculus in the cat : a quantitative study with HRP. *The Journal of comparative neurology*, 190(2) :333–56.
- [Watanabe, 1992] Watanabe, M. (1992). Frontal units of the monkey coding the associative significance of visual and auditory stimuli. *Experimental brain research*, 89(2) :233–47.
- [Webb, 2001] Webb, B. (2001). Can robots make good models of biological behaviour? *The Behavioral and brain sciences*, 24(6) :1033–50 ; discussion 1050–94.
- [Welch, 1967] Welch, P. (1967). The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra : A method based on time averaging over short, modified periodograms. *Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions on*, 15(2) :70–73.
- [Werner-Reiss et al., 2003] Werner-Reiss, U., Kelly, K. A., Trause, A. S., Underhill, A. M., and Groh, J. M. (2003). Eye position affects activity in primary auditory cortex of primates. *Current biology*, 13(7) :554–62.
- [Wever, 1949] Wever, E. (1949). *Theory of hearing*. Wiley New York.
- [Wiener, 1947] Wiener, F. (1947). The Diffraction of a Progressive Sound Wave by the Human Head. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19 :290.
- [Wilson, 1990] Wilson, S. W. (1990). The animat path to ai. In *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animats*, pages 15–21, Cambridge, MA, USA. MIT Press.
- [Wise and Jones, 1977] Wise, S. P. and Jones, E. G. (1977). Somatotopic and Columnar Organization in the Cortico-tectal Projection of the Rat Somatic Sensory Cortex. *Brain research*, 133 :223–235.
- [Wolfe et al., 2008] Wolfe, J., Hill, D. N., Pahlavan, S., Drew, P. J., Kleinfeld, D., and Feldman, D. E. (2008). Texture coding in the rat whisker system : Slip-stick versus differential resonance. *PLoS Biology*, 6(8) :e215.
- [Woolsey, 1967] Woolsey, T. A. (1967). Somatosensory, auditory and visual cortical areas of the mouse. *Johns Hopkins Medical Journal*, (121).
- [Wright et al., 1974] Wright, D., Hebrank, J., and Wilson, B. (1974). Pinna reflections as cues for localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56 :957.
- [Wright et al., 2003] Wright, T. M., Pelphey, K. A., Allison, T., McKeown, M. J., and McCarthy, G. (2003). Polysensory interactions along lateral temporal regions evoked by audiovisual speech. *Cerebral cortex New York NY 1991*, 13(10) :1034–1043.
- [Wurtz, 1996] Wurtz, R. H. (1996). Vision for the control of movement. The Friedenwald Lecture. *Investigative ophthalmology & visual science*, 37(11) :2130–45.

- [Wurtz and Goldberg, 1989] Wurtz, R. H. and Goldberg, M. E. (1989). *The Neurobiology of Saccadic Eye Movements (Reviews of Oculomotor Research)*. Elsevier Science Ltd.
- [Yau et al., 2009a] Yau, J. M., Hollins, M., and Bensmaia, S. J. (2009a). Textural timbre : The perception of surface microtexture depends in part on multimodal spectral cues. *Communucative & Integrative Biology*, 2(4).
- [Yau et al., 2009b] Yau, J. M., Olenczak, J. B., Dammann, J. F., and Bensmaia, S. J. (2009b). Temporal frequency channels are linked across audition and touch. *Current Biology*, 19 :561–566.
- [Yin, 2002] Yin, T. C. T. (2002). Neural mechanisms of encoding binaural localization cues in the auditory brainstem. In *In : Fay, R.R., Popper, A.N. (Eds.), Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, pages 99–159. SpringerVerlag.
- [Yost, 2000] Yost, W. A. (2000). *Fundamentals of Hearing : An Introduction*. Academic Press, NY, fourth edition.
- [Zangaladze et al., 1999] Zangaladze, A., Epstein, C., Grafton, S., and Sathian, K. (1999). Involvement of visual cortex in tactile discrimination of orientation. *Nature*, 401(October) :587–590.
- [Zhou and King, 1998] Zhou, W. and King, W. M. (1998). Premotor commands encode monocular eye movements. *Nature*, 393(6686) :692–5.
- [Zhou and Fuster, 2000] Zhou, Y. D. and Fuster, J. M. (2000). Visuo-tactile cross-modal associations in cortical somatosensory cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(17) :9777–82.
- [Zhou and Fuster, 2004] Zhou, Y.-D. and Fuster, J. M. (2004). Somatosensory cell response to an auditory cue in a haptic memory task. *Behavioural brain research*, 153(2) :573–8.
- [Zucker and Welker, 1969] Zucker, E. and Welker, W. (1969). Coding of somatic sensory input by vibrissae neurons in the rat’s trigeminal ganglion. *Brain Research*, 12(1) :138 – 156.
- [Zwiers et al., 2004] Zwiers, M. P., Versnel, H., and van Opstal, a. J. (2004). Involvement of monkey inferior colliculus in spatial hearing. *The Journal of Neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 24(17) :4145–56.